

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**UTJECAJ MJERILA NA STRUKTURU MODELIRANOG
ATMOSFERSKOG GRANIČNOG SLOJA**

DOKTORSKI RAD

HRVOJE KOZMAR

ZAGREB, 2005.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**UTJECAJ MJERILA NA STRUKTURU MODELIRANOG
ATMOSFERSKOG GRANIČNOG SLOJA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. ZDRAVKO VIRAG

HRVOJE KOZMAR

ZAGREB, 2005.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

UDK:	551.510.522, 533.6.071.072
Ključne riječi:	Atmosferski granični sloj, zračni tunel, modeliranje, mjerilo.
Znanstveno područje:	TEHNIČKE ZNANOSTI
Znanstveno polje:	Strojarstvo
Institucija u kojoj je rad izrađen:	Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje
Mentor rada:	Prof. dr. sc. Zdravko Virag
Broj stranica:	150
Broj slika:	136
Broj tablica:	7
Broj korištenih bibliografskih jedinica:	59
Datum obrane:	19.07.2005.
Povjerenstvo:	Prof. dr. sc. Andreja Werner Prof. dr. sc. Zdravko Virag Prof. dr. sc. Luka Sopta
Institucija u kojoj je rad pohranjen:	Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje

Zahvala

Ministarstvu znanosti i tehnologije Republike Hrvatske, Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD) i Hrvatskoj akademiji znanosti i umjetnosti (HAZU) zahvaljujem na financijskoj potpori.

Posebno zahvaljujem pok. prof. dr. sc. Zdravku Dolineru koji mi je omogućio provedbu istraživanja na Katedri za Mehaniku fluida Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Njegove riječi ohrabrenja, korisni stručni savjeti i potpora pridonijeli su uspješnoj provedbi eksperimentalnog dijela rada na Tehničkom Sveučilištu u Münchenu.

Mentoru prof. dr. sc. Zdravku Viragu zahvaljujem na pruženoj pomoći, stručnim savjetima i kritičkom osvrtu na rad.

Prof. Dr.-Ing. Borisu Laschki i Dr.-Ing. Albertu Pernpeintneru s Katedre za Mehaniku fluida Fakulteta strojarstva Tehničkog Sveučilišta u Münchenu zahvaljujem na potpori pri provedbi eksperimenata i raspravama o rezultatima mjerenja.

Djelatnicima radionica Katedre za Mehaniku fluida Fakulteta strojarstva Tehničkog Sveučilišta u Münchenu zahvaljujem na pomoći, korisnim primjedbama i sugestijama.

Kolegama s Katedre za Mehaniku fluida u Zagrebu zahvaljujem na preuzimanju nastavnih obveza i pomoći tijekom izrade ovog rada.

Saši Kreneku, Tomislavu Cvrlji, Nikši Piroviću i Denisu Periću zahvaljujem na potpori tijekom boravka u Münchenu.

Ljubav i strpljenje mojih najdražih, supruge Ane, kćeri Mare i sina Marka, sestre i roditelja, dali su mi potrebnu snagu za uspješno dovršenje ovog rada.

Sadržaj

Sadržaj	i
Predgovor	iii
Sažetak	iv
Abstract	v
Ključne riječi	vi
Popis oznaka	vii
Popis slika	xii
Popis tablica	xviii
1. Uvod	1
1.1. Definicija problema	1
1.2. Hipoteza rada	4
1.3. Sadržaj istraživanja	4
2. Osnove	6
2.1. Atmosferski granični sloj	6
2.1.1. Struktura strujanja u atmosferskom graničnom sloju	8
2.1.2. Atmosferska turbulencija	13
2.2. Generiranje modela atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu	19
2.2.1. Zračni tuneli s dugom mjernom sekcijom	19
2.2.2. Zračni tuneli s kratkom mjernom sekcijom	20
2.2.3. Counihanova metoda	22
2.3. Sličnost strujanja	23
2.3.1. Osnovne jednačbe	23
2.3.2. Pregled kriterija sličnosti kod drugih autora	28
2.3.3. Odabrani kriteriji sličnosti	32
3. Plan istraživanja	34
4. Eksperimentalna istraživanja u zračnom tunelu	38
4.1. Zračni tunel	38
4.2. Generiranje graničnog sloja Counihanovom metodom	41
4.2.1. Barijera	41
4.2.2. Generatori vrtloga	43

4.2.3. Podna hrapavost.....	49
4.3. Opis mjerne opreme i specifikacija mjernih parametara.....	50
4.3.1. Mjerenje brzine	50
4.3.2. Mjerenje tlaka	54
5. Rezultati i diskusija	57
5.1. Profili osrednjenih brzina.....	61
5.2. Intenzitet turbulencije	65
5.3. Reynoldsovo naprezanje.....	70
5.4. Integralna duljinska mjera turbulencije	74
5.5. Spektralna raspodjela energije turbulentnih pulzacija	78
6. Zaključak	87
Literatura	91
Prilog	96
Životopis	
Biography	

Predgovor

S naglim razvojem tehnika građenja u drugoj polovici 20. stoljeća počinju se graditi izuzetno visoki industrijski, poslovni i stambeni objekti kompleksne arhitekture. Kao posljedica se javlja potreba za određivanjem utjecaja strujanja zraka na građevinske objekte, što daje poticaj razvoju posebne grane mehanike fluida, industrijske aerodinamike. Najvažniji problemi koji se rješavaju u okviru industrijske aerodinamike odnose se na određivanje statičkih i dinamičkih opterećenja građevinskih objekata uzrokovanih strujanjem zraka i koncentracije štetnih plinova u blizini izvora.

Navedene probleme nije moguće istražiti uz primjenu teorijskih metoda zbog nemogućnosti točnog modeliranja turbulencije, pa je nužna primjena eksperimentalnog pristupa. Eksperimentalna ispitivanja se provode u pripreмноj fazi gradnje na modelu objekta u zračnom tunelu.

Preduvjet ispitivanjima na modelu objekta je generiranje modela atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu. Zračni tuneli za eksperimentalna istraživanja u području industrijske aerodinamike izvedeni su diljem svijeta uz različite dimenzije mjerne sekcije. Namijenjeni su za izvođenje modelskih ispitivanja u različitim mjerilima.

Budući da utjecaj mjerila na strukturu modela atmosferskog graničnog sloja dosad nije istražen, pristupio sam istraživanjima opisanim u okviru ovog rada.

Istraživanja su provedena na Katedri za Mehaniku fluida Fakulteta strojarstva Tehničkog Sveučilišta u Münchenu i Katedri za mehaniku fluida Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Sažetak

Eksperimentalno je istražen utjecaj mjerila na strukturu modeliranog atmosferskog graničnog sloja i promjene strukture strujanja u određenom mjerilu za različite modele atmosferskog graničnog sloja. U zračnom tunelu su Counihanovom metodom generirani modeli atmosferskog graničnog sloja karakterizirani eksponentom zakona potencije $\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35 u mjerilima 1:500, 1:333 i 1:250. Razmatrane su vrijednosti najvažnijih parametara koji definiraju strukturu strujanja: osrednjene vrijednosti brzine \bar{u} , intenziteti turbulencije I_u , I_v i I_w , tangencijalno Reynoldsovo naprezanje $-\rho \overline{u'w'}$, integralna duljinska mjera turbulencije $L_{u,x}$ i spektar turbulentnih pulzacija S_u . Potvrđena je osnovna hipoteza rada da mjerilo simulacije ima utjecaja na strukturu modela atmosferskog graničnog sloja. U gornjem dijelu graničnog sloja s povećanjem mjerila dolazi do smanjenja osrednjenih vrijednosti brzine zbog utjecaja sekundarnog graničnog sloja, a intenzitet turbulencije brže opada s povećanjem visine. Iznosi Reynoldsovog naprezanja u gornjem dijelu modela atmosferskog graničnog sloja se smanjuju s povećanjem mjerila. U donjem dijelu graničnog sloja razlike vremenski osrednjenih struktura strujanja u različitim mjerilima su relativno male. Vrijednosti intenziteta turbulencije i Reynoldsovog naprezanja su veće u mjerilu u kojem je postignuta veća hrapavost podloge. Integralna duljinska mjera turbulencije se na određenoj visini unutar graničnog sloja povećava sa smanjenjem mjerila. Razlike u profilima spektara energije turbulentnih pulzacija uslijed promjene mjerila se mogu zanemariti.

Abstract

Scale effects on the structure of atmospheric boundary layer model were experimentally investigated. Changes in the flow structure for the same scale and different atmospheric boundary layer models were also under examination. Using the Counihan method, atmospheric boundary layer models characterized by the power law exponents $\alpha = 0.17, 0.21$ and 0.35 in the scales of 1:500, 1:333 and 1:250, were generated in the wind tunnel. The most important parameters of flow structure, e.g. mean velocity \bar{u} , turbulence intensities I_u, I_v, I_w , Reynolds stress $-\overline{\rho u'w'}$, integral length scale $L_{u,x}$, power spectra S_u , were discussed. The main hypothesis of this work has been confirmed. The changes of the simulation scale affect the flow structure in the model of atmospheric boundary layer. In the upper part of the boundary layer the mean velocities decrease with an increase in the scale due to a secondary boundary layer, and simultaneously the turbulence intensity decreases faster with an increase in the height. The Reynolds stress in the upper part of the boundary layer decreases with an increase in the scale. In the lower part of the boundary layer variations of the mean flow in different scales are relatively small. The turbulence intensity and Reynolds stress are higher in the scales with a rougher surface. The integral length scale at a specific height of the boundary layer increases with a decrease in the scale. Excursions of power spectra due to changes of the scale can be neglected.

Ključne riječi

Atmosferski granični sloj, zračni tunel, modeliranje, mjerilo.

Atmospheric boundary layer, wind tunnel, modeling, scale.

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Naziv
a	-	koeficijent raspodjele mjernih mjesta po visini
b_G	m	širina generatora vrtloga
d	m	debljina istisnuća
e	V	električni napon
f	1/s	frekvencija
f	N	ukupna masena sila
f_i	N	komponente ukupne masene sile
\vec{f}^c	N/kg	masena gustoća Coriolisove sile
f_i^c	N/kg	komponente masene gustoće Coriolisove sile
f_m	1/s	frekvencija pri kojoj izraz $f \cdot S_u(f)$ postiže maksimalnu vrijednost
f_{Mm}	1/s	frekvencija pri kojoj S_u kod modela postiže maksimalnu vrijednost
f_{Mp}	1/s	frekvencija pri kojoj S_u kod prototipa postiže maksimalnu vrijednost
g	m/s ²	gravitacijsko ubrzanje
h	m	visina objekta
h_G	m	visina generatora vrtloga
k_w	1/m	valni broj
l_G	m	duljina generatora vrtloga
m	kg	masa
n	1/min	broj okretaja
p	Pa	tlak
p_0	Pa	hidrostatski tlak
$p_r = p - p_0$	Pa	relativni tlak u Boussinesqovoj aproksimaciji
t	s	vrijeme
u, v, w	m/s	apsolutne vrijednosti brzine u x, y i z smjeru
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	m/s	osrednjene vrijednosti brzine u x, y i z smjeru

Oznaka	Jedinica	Naziv
u', v', w'	m/s	pulzirajuće vrijednosti brzine u x, y i z smjeru
\bar{u}_{3600}	m/s	osrednjena vrijednost brzine u x smjeru uz trajanje akvizicije $t = 3600$ s
$\bar{u}_{\delta}, u_{\text{bez}}$	m/s	osrednjena vrijednost brzine u x smjeru na gornjem rubu graničnog sloja
$\bar{u}_{\delta m}$	m/s	osrednjena vrijednost brzine u x smjeru na visini $z = \delta$ kod modela
$\bar{u}_{\delta p}$	m/s	osrednjena vrijednost brzine u x smjeru na visini $z = \delta$ kod prototipa
\bar{u}_z	m/s	osrednjena vrijednost brzine u x smjeru na visini z
\bar{u}_{ref}	m/s	osrednjena vrijednost brzine u x smjeru na referentnoj visini
\bar{u}_{10}	m/s	osrednjena vrijednost brzine u x smjeru na visini 10 m
u_{τ}	m/s	brzina trenja
u_{rm}	m/s	brzina trenja kod modela
u_{rp}	m/s	brzina trenja kod prototipa
x, y, z	-	osi koordinatnog sustava
x_i	-	osi koordinatnog sustava
z	m	visina
z_0	m	aerodinamička duljina hrapavosti
z_{ref}	m	referentna visina
z_{0m}	m	aerodinamička duljina hrapavosti kod modela
z_{0p}	m	aerodinamička duljina hrapavosti kod prototipa
z_{n+1}	m	visina mjernog mjesta $n+1$
z_n	m	visina n -tog mjernog mjesta
$z_N = \delta$	m	visina najvišeg mjernog mjesta (mj. mjesto N)

Oznaka	Jedinica	Naziv
z_1	m	visina najnižeg mjernog mjesta (mj. mjesto 1)
A	-	konstanta kalibracije užarene žice
A_K	m ²	površina poprečnog presjeka mjerne sekcije zračnog tunela
A_M	m ²	projekcija nastrujane površine modela
B	-	konstanta kalibracije užarene žice
E	V	napon Wheatstoneovog mosta
\bar{F}^c	N	Coriolisova sila
Fr	-	Froudeov broj
Gr	-	Grashofov broj
I_u, I_v, I_w	-	intenzitet turbulencije u x, y i z smjeru
$I_{u,20}$	-	intenzitet turbulencije u x smjeru pri $\bar{u}_{10} = 20 \text{ m/s}$
Je	-	Jensenov broj
L	m	karakteristična duljina
$L_{u,x}, L_{u,y}, L_{u,z}$	m	integralna duljinska mjera turbulencije u x, y i z smjeru
M	-	mjerilo
N	-	broj mjernih mjesta
\dot{Q}	W	količina izmijenjenog toplinskog toka između užarene žice i okoliša
R	Ω	električni otpor
R_w	Ω	električni otpor užarene žice
$R_{u,x}$	-	koeficijent korelacije
Re	-	Reynoldsov broj
Re_R	-	Reynoldsov broj definiran s aerodinamičkom duljinom hrapavosti z_0
Ro	-	Rossbyev broj
S_u	m ² /s	spektralna gustoća energije turbulentnih pulzacija u x smjeru (spektar snage)
St	-	Strouhalov broj

Oznaka	Jedinica	Naziv
T	K	temperatura
T_w	K	temperatura užarene žice
T_0	K	temperatura okoliša
T	s	vrijeme akvizicije podataka
V_∞	m/s	brzina slobodne struje zraka ($z \geq \delta$)
X_u	-	bezdimenzijska frekvencija
α	-	eksponent zakona potencije
α_m	-	eksponent zakona potencije kod modela
α_p	-	eksponent zakona potencije kod prototipa
δ	m	debljina graničnog sloja
δ_{ij}	-	Kroneckerov simbol
δ_m	m	debljina graničnog sloja kod modela
δ_p	m	debljina graničnog sloja kod prototipa
δ_s	m	debljina sekundarnog graničnog sloja
ε_{ijk}	-	permutacijski simbol
κ	-	von Kármánova konstanta
λ	m	valna duljina vrtloga
λ	-	parametar sličnosti
λ_R	-	koeficijent trenja
μ	kg/(ms)	dinamička viskoznost
ω	1/s	kružna frekvencija
ω	1/s	kutna brzina
ν	m ² /s	kinematička viskoznost
ν_{zrak}	m ² /s	kinematička viskoznost zraka
ρ	kg/m ³	gustoća zraka
ρ_0	kg/m ³	referentna gustoća zraka
$\sigma_u = \sqrt{u'^2}$	m/s	standardna devijacija brzine u x smjeru

Oznaka	Jedinica	Naziv
$\sigma_v = \sqrt{v'^2}$	m/s	standardna devijacija brzine u y smjeru
$\sigma_w = \sqrt{w'^2}$	m/s	standardna devijacija brzine u z smjeru
τ	N/m ²	tangencijalno naprezanje
τ	s	vrijeme
Φ	-	kut geografske širine
$\bar{\Omega}$	1/s	kutna brzina ω u lokalnom koordinatnom sustavu
Ω_i	1/s	komponente kutne brzine ω u lokalnom koordinatnom sustavu

Napomena:

Veličine nadvučene s "~" označuju bezdimenzijske veličine.

Veličine s indeksom "R" označuju referentne vrijednosti.

Popis slika

Slika 2.1: Atmosferski granični sloj, prema Simiu, Scanlan [26]	6
Slika 2.2: Shematski prikaz strukture atmosferskog graničnog sloja, prema Garratt [29]	7
Slika 2.3: Brzine strujanja zraka u smjeru glavnog strujanja unutar atmosferskog graničnog sloja, prema Dyrbye, Hansen [30]	9
Slika 2.4: Ovisnost iznosa aerodinamičke duljine hrapavosti z_0 o strukturi podloge, prema ESDU [31]	10
Slika 2.5: Pojednostavljeni prikaz područja valjanosti zakona potencije u slučaju rijetko raspoređenih objekata na podlozi, prema Dyrbye, Hansen [30]	11
Slika 2.6: Područje valjanosti zakona potencije u slučaju gusto raspoređenih objekata na podlozi (šuma), prema Dyrbye, Hansen [30]	12
Slika 2.7: Profili osrednjenih vrijednosti brzine, prema Pernpeintner [37]	12
Slika 2.8: Intenzitet turbulencije u prirodi, prema ESDU [31]	14
Slika 2.9: Shematski prikaz strukture spektra kinetičke energije turbulencije, prema Garratt [29]	16
Slika 2.10: Spektar kinetičke energije turbulencije u smjeru glavnog strujanja; usporedba empirijske krivulje rezultatima eksperimenata, prema Davenport [39]	17
Slika 2.11: Generiranje graničnog sloja s dugom mjernom sekcijom (Colorado State University), prema Plate [42]	20
Slika 2.12: Counihanova metoda generiranja graničnog sloja, prema Plate [42]	21
Slika 2.13: Cookova metoda generiranja graničnog sloja, prema Plate [42] ...	21
Slika 2.14: Teunissenova metoda generiranja graničnog sloja, prema Plate [42]	21
Slika 2.15: Princip generiranja graničnog sloja Counihanovom metodom, prema Wanninger [43]	23
Slika 2.16: Kutna brzina rotacije Zemlje	25
Slika 2.17: Lokalni koordinatni sustav	25

Slika 2.18: Generiranje modela atmosferskog graničnog sloja u različitim mjerilima	29
Slika 2.19: Vrijednost koeficijenta trenja $\lambda_R/2$ kao funkcije aerodinamičke duljine hrapavosti z_0 , prema Pasquill [46] i Duchene-Marullaz [47]	30
Slika 4.1: Zračni tunel C Katedre za Mehaniku fluida Fakulteta strojarstva Tehničkog Sveučilišta u Münchenu	39
Slika 4.2: Po visini podesiv strop mjerne sekcije zračnog tunela	40
Slika 4.3: Barijere u mjerilu 1:500	42
Slika 4.4: Barijere u mjerilu 1:333	43
Slika 4.5: Barijera u mjerilu 1:250	43
Slika 4.6: Generator vrtloga u mjerilima 1:500 i 1:333	44
Slika 4.7: Generator vrtloga u mjerilu 1:250	45
Slika 4.8: Raspored barijere i generatora vrtloga u mjernoj sekciji zračnog tunela u mjerilu 1:500	46
Slika 4.9: Raspored barijere i generatora vrtloga u mjernoj sekciji zračnog tunela u mjerilu 1:333	47
Slika 4.10: Raspored barijere i generatora vrtloga u mjernoj sekciji zračnog tunela u mjerilu 1:250	48
Slika 4.11: Dimenzije LEGO kocke	49
Slika 4.12: Struktura podne hrapavosti R4.....	49
Slika 4.13: Komponente sustava za mjerenje brzine anemometrom konstantne temperature (CTA).....	50
Slika 4.14: Shema spajanja užarene žice u Wheatstoneov most.....	52
Slika 4.15: Trostruka užarena žica Dantec 55P91	52
Slika 4.16: AALAB AN 1003 anemometar konstantne temperature (CTA)	53
Slika 4.17: Kalibracioni kanal	54
Slika 4.18: Profili statičkog tlaka na stropu mjerne sekcije ovisnu o kutu nagiba stropa (granični sloj $\alpha = 0.21$, mjerilo 1:500)	55
Slika 4.19: Profil statičkog tlaka na stropu mjerne sekcije pri kutu nagiba stropa 0.5° (granični sloj $\alpha = 0.21$, mjerilo 1:500).....	56

Slika 5.1: Usporedba α/z_0 kod generiranih graničnih slojeva u okviru ovog rada s rezultatima mjerenja drugih autora	59
Slika 5.2: Model atmosferskog graničnog sloja ($\alpha = 0.17$, mjerilo 1:500, barijera 5, podna hrapavost R7)	60
Slika 5.3: Profil osrednjenih brzina ($\alpha = 0.17$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250) ...	62
Slika 5.4: Profil osrednjenih brzina ($\alpha = 0.21$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250) ...	62
Slika 5.5: Profil osrednjenih brzina ($\alpha = 0.35$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250) ...	63
Slika 5.6: Profil osrednjenih brzina (mjerilo 1:500, $\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35)	64
Slika 5.7: Profil osrednjenih brzina (mjerilo 1:333, $\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35)	64
Slika 5.8: Profil osrednjenih brzina (mjerilo 1:250, $\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35)	65
Slika 5.9: Intenzitet turbulencije ($\alpha = 0.17$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)	67
Slika 5.10: Intenzitet turbulencije ($\alpha = 0.21$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)	67
Slika 5.11: Intenzitet turbulencije ($\alpha = 0.35$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)	68
Slika 5.12: Intenzitet turbulencije (mjerilo 1:500, $\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35)	69
Slika 5.13: Intenzitet turbulencije (mjerilo 1:333, $\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35)	69
Slika 5.14: Intenzitet turbulencije (mjerilo 1:250, $\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35)	70
Slika 5.15: Reynoldsovo naprezanje (mjerilo 1:500, $\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35)	71
Slika 5.16: Reynoldsovo naprezanje (mjerilo 1:333, $\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35)	71
Slika 5.17: Reynoldsovo naprezanje (mjerilo 1:250, $\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35)	72
Slika 5.18: Reynoldsovo naprezanje ($\alpha = 0.17$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)	72
Slika 5.19: Reynoldsovo naprezanje ($\alpha = 0.21$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)	73
Slika 5.20: Reynoldsovo naprezanje ($\alpha = 0.35$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)	73
Slika 5.21: Integralna duljinska mjera turbulencije ($\alpha = 0.17$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)	75
Slika 5.22: Integralna duljinska mjera turbulencije ($\alpha = 0.21$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)	75
Slika 5.23: Integralna duljinska mjera turbulencije ($\alpha = 0.35$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)	76
Slika 5.24: Ovisnost iznosa integralne duljinske mjere turbulencije $L_{u,x}$ o strukturi podne hrapavosti u mjerilu 1:500 u donjem dijelu graničnog sloja	77

Slika 5.25: Ovisnost iznosa integralne duljinske mjere turbulencije $L_{u,x}$ o strukturi podne hrapavosti u mjerilu 1:333 u donjem dijelu graničnog sloja	77
Slika 5.26: Ovisnost iznosa integralne duljinske mjere turbulencije $L_{u,x}$ o strukturi podne hrapavosti u mjerilu 1:250 u donjem dijelu graničnog sloja	78
Slika 5.27: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije ($\alpha = 0.17$, $z = 30$ m).....	80
Slika 5.28: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije ($\alpha = 0.17$, $z = 100$ m).....	80
Slika 5.29: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije ($\alpha = 0.21$, $z = 30$ m).....	81
Slika 5.30: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije ($\alpha = 0.21$, $z = 100$ m).....	81
Slika 5.31: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije ($\alpha = 0.35$, $z = 30$ m).....	82
Slika 5.32: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije ($\alpha = 0.35$, $z = 100$ m).....	82
Slika 5.33: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije (mjerilo 1:500, $z = 100$ m)	83
Slika 5.34: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije (mjerilo 1:333, $z = 100$ m)	83
Slika 5.35: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije (mjerilo 1:250, $z = 100$ m)	84
Slika 5.36: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije ($\alpha = 0.17$, mjerilo 1:250, $z = 30$ i 100 m)	85
Slika 5.37: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije ($\alpha = 0.21$, mjerilo 1:250, $z = 30$ i 100 m)	85
Slika 5.38: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije ($\alpha = 0.35$, mjerilo 1:250, $z = 30$ i 100 m)	86
Slika A.1: Mjerilo 1:500, barijera 1, podna hrapavost R1.....	97
Slika A.2: Mjerilo 1:500, barijera 2, podna hrapavost R1.....	98

Slika A.3: Mjerilo 1:500, barijera 3, podna hrapavost R1	99
Slika A.4: Mjerilo 1:500, barijera 1, podna hrapavost R2	100
Slika A.5: Mjerilo 1:500, barijera 1, podna hrapavost R3	101
Slika A.6: Mjerilo 1:500, barijera 3, podna hrapavost R3	102
Slika A.7: Mjerilo 1:500, barijera 2, podna hrapavost R3	103
Slika A.8: Mjerilo 1:500, barijera 1, podna hrapavost R4	104
Slika A.9: Mjerilo 1:500, barijera 3, podna hrapavost R4	105
Slika A.10: Mjerilo 1:500, barijera 4, podna hrapavost R4	106
Slika A.11: Mjerilo 1:500, barijera 5, podna hrapavost R4	107
Slika A.12: Mjerilo 1:500, barijera 6, podna hrapavost R4	108
Slika A.13: Mjerilo 1:500, barijera 7, podna hrapavost R4	109
Slika A.14: Mjerilo 1:500, barijera 8, podna hrapavost R4	110
Slika A.15: Mjerilo 1:500, barijera 9, podna hrapavost R4	111
Slika A.16: Mjerilo 1:500, barijera 10, podna hrapavost R4	112
Slika A.17: Mjerilo 1:500, barijera 11, podna hrapavost R4	113
Slika A.18: Mjerilo 1:500, barijera 5, podna hrapavost R6	114
Slika A.19: Mjerilo 1:500, barijera 5, podna hrapavost R7	115
Slika A.20: Mjerilo 1:500, barijera 5, podna hrapavost R9	116
Slika A.21: Mjerilo 1:500, barijera 3, podna hrapavost R9	117
Slika A.22: Mjerilo 1:500, barijera 5, podna hrapavost R8	118
Slika A.23: Mjerilo 1:500, barijera 5, podna hrapavost R5	119
Slika A.24: Mjerilo 1:500, barijera 5, podna hrapavost R10	120
Slika A.25: Mjerilo 1:333, barijera 12, podna hrapavost R16	121
Slika A.26: Mjerilo 1:333, barijera 12, podna hrapavost R13	122
Slika A.27: Mjerilo 1:333, barijera 13, podna hrapavost R13	123
Slika A.28: Mjerilo 1:333, barijera 14, podna hrapavost R13	124
Slika A.29: Mjerilo 1:333, barijera 14, podna hrapavost R11	125
Slika A.30: Mjerilo 1:333, barijera 13, podna hrapavost R7	126
Slika A.31: Mjerilo 1:333, barijera 14, podna hrapavost R10	127
Slika A.32: Mjerilo 1:333, barijera 14, podna hrapavost R12	128
Slika A.33: Mjerilo 1:333, barijera 13, podna hrapavost R15	129
Slika A.34: Mjerilo 1:333, barijera 13, podna hrapavost R14	130
Slika A.35: Mjerilo 1:333, barijera 13, podna hrapavost R17	131

Slika A.36: Mjerilo 1:333, barijera 12, podna hrapavost R17.....	132
Slika A.37: Mjerilo 1:250, barijera 15, podna hrapavost R17.....	133
Slika A.38: Mjerilo 1:250, barijera 15, podna hrapavost R18.....	134
Slika A.39: Mjerilo 1:250, barijera 15, podna hrapavost R19.....	135
Slika A.40: Mjerilo 1:250, barijera 15, podna hrapavost R15.....	136
Slika A.41: Mjerilo 1:250, barijera 15, podna hrapavost R13.....	137
Slika B.1: Podna hrapavost R1.....	139
Slika B.2: Podna hrapavost R2.....	139
Slika B.3: Podna hrapavost R3.....	140
Slika B.4: Podna hrapavost R4.....	140
Slika B.5: Podna hrapavost R5.....	141
Slika B.6: Podna hrapavost R6.....	141
Slika B.7: Podna hrapavost R7.....	142
Slika B.8: Podna hrapavost R8.....	142
Slika B.9: Podna hrapavost R9.....	143
Slika B.10: Podna hrapavost R13	143
Slika B.11: Podna hrapavost R10	144
Slika B.12: Podna hrapavost R11	145
Slika B.13: Podna hrapavost R12	146
Slika B.14: Podna hrapavost R14	147
Slika B.15: Podna hrapavost R15	147
Slika B.16: Podna hrapavost R16	148
Slika B.17: Podna hrapavost R17	148
Slika B.18: Podna hrapavost R18	149
Slika B.19: Podna hrapavost R19	150

Popis tablica

Tablica 2.1: Pregled raspona dimenzija vrtloga kod modela atmosferskog graničnog sloja u različitim mjerilima	29
Tablica 2.2: Kriteriji sličnosti pri modeliranju atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu, prema Plate [42]	31
Tablica 3.1: Raspodjela mjernih mjesta po visini	36
Tablica 5.1: Vrijednosti bitnih parametara za modele atmosferskog graničnog sloja u mjerilu 1:500.....	57
Tablica 5.2: Vrijednosti bitnih parametara za modele atmosferskog graničnog sloja u mjerilu 1:333.....	58
Tablica 5.3: Vrijednosti bitnih parametara za modele atmosferskog graničnog sloja u mjerilu 1:250.....	58
Tablica 5.4: Odnosi intenziteta turbulencije I_v/I_u i I_w/I_u u donjem dijelu graničnog sloja.....	66

1. Uvod

1.1. Definicija problema

S naglim razvojem tehnika građenja u drugoj polovici 20. stoljeća povećava se interes za rješavanjem problema vezanih uz opstrujavanje objekata smještenih unutar atmosferskog graničnog sloja, koji se proteže do približno 500 m visine u odnosu na površinu Zemlje. Najčešće je potrebno odrediti statička i dinamička opterećenja građevinskih objekata uzrokovana strujanjem zraka i koncentraciju štetnih plinova u blizini izvora.

Za rješavanje problema ove vrste još uvijek ne postoje dovoljno dobri teorijski modeli (zbog problema modeliranja turbulencije), pa je nužna primjena eksperimentalnog pristupa. Da bi se na temelju rezultata modelskih ispitivanja mogle predvidjeti pojave na prototipu potrebno je precizno simulirati uvjete strujanja iz prirode u zračnom tunelu. Modelom atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu smatra se takvo strujanje kod kojeg su vrijednosti strukturnih parametara graničnog sloja u zračnom tunelu u granicama izmjerenih vrijednosti u prirodi.

Zračni tuneli za mjerenja u modeliranom atmosferskom graničnom sloju izvedeni su u raznim znanstvenim institucijama diljem svijeta na različite načine uz različite dimenzije mjerne sekcije, pa se isti problemi iz prirode u različitim zračnim tunelima modeliraju u različitim mjerilima.

Pri izboru mjerila potrebno je postići kompromis između dva kontradiktorna zahtjeva. Po jednom se traži da ispitivani model bude što veći, čime se postiže preciznije modeliranje strujanja zraka oko modela. Po drugom je zahtjevu potrebno da stupanj začepljenosti mjerne sekcije (engl. blockage) ne bude veći od 5%, čime se onemogućava deformacija strujanja zraka uslijed prevelikog modela. Najčešće korištena mjerila simulacije atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu se kreću od 1:500 do 1:250.

Postoji nekoliko metoda modeliranja atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu. Counihan [1], [2], [3] koristi sustav sastavljen od barijere, generatora vrtloga i podne hrapavosti u mjerilima od 1:250 do 1:500. Ovom metodom je

granični sloj potpuno razvijen i stabilan na udaljenosti 3-4 debljine graničnog sloja nizvodno od generatora vrtloga. Na strukturu strujanja utječu oblik generatora i barijere, te visina i gustoća raspodjele elemenata podne hrapavosti, kao i raspored navedenih objekata u mjernoj sekciji zračnog tunela, prema Counihan [3], [4], [5]. U prethodno provedenim istraživanjima, prema Kozmar [6], analiziran je utjecaj promjene visine barijere, visine ispupčenja na barijeri, te visine i raspodjele elemenata podne hrapavosti na strukturu modela atmosferskog graničnog sloja $\alpha = 0.21$ u mjerilu 1:500, kao i promjene strukture graničnog sloja u uzdužnom i poprečnom smjeru, te u odnosu na pojedinačne elemente podne hrapavosti i generatore vrtloga. Zaključeno je da se povećanjem hrapavosti podloge smanjuje iznos osrednjene vrijednosti brzine u uzdužnom smjeru na konstantnoj visini u donjem dijelu graničnog sloja. S povećanjem visine barijere smanjuje se iznos količine gibanja struje zraka unutar graničnog sloja, pri čemu je ova pojava izraženija u donjem dijelu graničnog sloja. Intenzitet turbulencije u x smjeru se povećava s povišenjem barijere, pri čemu je utjecaj promjene visine barijere na iznose intenziteta turbulencije u x smjeru veći u donjem dijelu graničnog sloja. Iznos Reynoldsovog tangencijalnog naprezanja $-\overline{\rho u'w'}$ u donjem dijelu graničnog sloja se ne mijenja s promjenom visine barijere i konstantan je u cijelom navedenom području. S povećanjem visine barijere se granica, do koje je iznos $-\overline{\rho u'w'}$ naprezanja konstantan, pomiče u gornje dijelove graničnog sloja. Promjenom visine ispupčenja na barijeri se ostvaruje sličan učinak kao i promjenom visine barijere. Counihanovu metodu je unaprijedio Robins [7] i primijenio pri određivanju koncentracije štetnih plinova i opterećenja na objektima smještenim unutar modela atmosferskog graničnog sloja. Iyengar i dr. [8] određuju iznos aerodinamičke duljine hrapavosti z_0 na osnovu izmjereno Reynoldsovog naprezanja, pri čemu granični sloj generiraju Counihanovom metodom. Farell i dr. [9] također generiraju granični sloj iznad naseljenog područja uz primjenu Counihanove metode. Pritom analiziraju eksperimentalne pogreške pri određivanju Reynoldsovog i površinskog naprezanja, duljine hrapavosti z_0 i integralne duljinske mjere turbulencije.

Cook [10], [11] primjenjuje mrežu, barijeru i podnu hrapavost pri simulaciji donjeg dijela neutralnog atmosferskog graničnog sloja. Ova je metoda prikladna za primjenu u manjim zračnim tunelima.

Metoda upuhavanja zraka, prema Schon i dr. [12] i Nagib i dr. [13], kao i sustav s više zračnih turbopuhala, prema Teunissen [14], se koriste pri generiranju graničnog sloja u mjerilima nepovoljnim za ispitivanje opterećenja na samostojećim obiteljskim stambenim objektima. Primjenom ovih metoda se mogu vrlo dobro generirati profili osrednjenih vrijednosti brzine. Pritom ne postoji zadovoljavajući mehanizam za prirodno generiranje turbulentnog naprezanja, što onemogućava nastanak odgovarajuće turbulentne strukture strujanja.

Jednostavna i efikasna metoda modeliranja atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu uključuje upotrebu dvodimenzionalnih generatora vrtloga ili klinova koji pridonose formiranju turbulentnog graničnog sloja na ulazu u mjernu sekciju zračnog tunela. Ovom metodom je, prema Melbourne [15] i Standen [16], moguće generirati i vremenski osrednjenu i turbulentnu strukturu graničnog sloja. Ova se metoda nije pokazala optimalnom za određivanja raspodjele tlaka na modelu, prema Melbourne [15] i Standen i dr. [17].

Armitt [18] koristi sustav sastavljen od barijere i generatora vrtloga, a Lloyd [19] primjenjuje kombinaciju generatora vrtloga i mreže. Reynoldsova naprezanja i intenziteti turbulencije dobiveni uz primjenu ovih metoda su niži u usporedbi s podacima iz prirode i naglo se mijenjaju u uzdužnom i vertikalnom smjeru.

Pri često korištenoj Templinovoj metodi [20] je iznos kinetičke energije turbulencije nedovoljno visok, a javljaju se i znatna odstupanja unutar profila osrednjenih vrijednosti brzine.

Wier i dr. [21] su modelirali unutarnji granični sloj samo uz primjenu podne hrapavosti. Nedostatak ove metode je nemogućnost generiranja kompletnog graničnog sloja.

Tieleman i dr. [22] su razvili sustav generatora vrtloga i podne hrapavosti. Ovom metodom nije moguće točno modelirati sve bitne parametre strukture strujanja.

Sundaram i dr. [23] su primijenili barijeru i podnu hrapavost, a u jednoj konfiguraciji i generatore vrtloga. Pritom je struktura strujanja i bez primjene generatora vrtloga zadovoljavajuće modelirana, kada je postignuta optimalna

kombinacija barijere i podne hrapavosti. Međutim, i u ovom slučaju postoji poteškoća zadovoljavajućeg modeliranja turbulentne strukture strujanja, budući da generatori vrtloga imaju odlučujuću ulogu prilikom nastanka vrtloga s vertikalnom osi vrtnje.

Profile osrednjenih vrijednosti brzine modelirali su Cockrell i dr. [24] uz primjenu mreže šipki i uređaja za miješanje struje zraka. Uređaj za miješanje je izrađen prema Schubauer i dr. [25]. Osrednjenu strukturu strujanja moguće je primjenom ove metode zadovoljavajuće dobro modelirati, ali turbulentna struktura i u ovom slučaju ne odgovara slici strujanja iz prirode.

Dosadašnja iskustva pokazuju da se uz primjenu Counihanove metode rezultati dobiveni u zračnom tunelu najbolje podudaraju s rezultatima mjerenja iz prirode, pa se Counihanova metoda koristi i u okviru ovog rada. Budući da se ne može uspostaviti jednoznačna veza između oblika i načina raspodjele objekata za generiranje graničnog sloja i strukture strujanja, odabir mjerila ima značajnu ulogu na strukturu modela atmosferskog graničnog sloja.

1.2. Hipoteza rada

Osnovna hipoteza ovog rada je da će se strukture modela atmosferskog graničnog sloja razlikovati u različitim mjerilima iako su generirane primjenom iste metode. Budući da navedena problematika do danas nije sustavno istražena, u okviru ovog rada bit će istražen utjecaj mjerila na strukturu modeliranog atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu i razlike u strukturi strujanja za tri tipična modela i tri mjerila koja se najčešće koriste u praksi. Pritom će se istražiti razlike u vrijednostima svih relevantnih parametara koji karakteriziraju strujanje unutar graničnog sloja.

1.3. Sadržaj istraživanja

U okviru ovog rada generirani su modeli atmosferskog graničnog sloja, koji su karakterizirani eksponentom zakona potencije α , a nastaju strujanjem zraka iznad:

- polja s rijetko raspoređenim i niskim raslinjem ($\alpha = 0.17$),
- predgrađa s niskim obiteljskim kućama i niskim stablima ($\alpha = 0.21$),
- centra grada s visokim i gusto raspoređenim zgradama ($\alpha = 0.35$).

Navedeni granični slojevi su modelirani u zračnom tunelu Counihanovom metodom u mjerilima 1:500, 1:333 i 1:250. Vrijednost mjerila se određuje iz odnosa modelske i prototipne debljine atmosferskog graničnog sloja, pri čemu se uzima da debljina atmosferskog graničnog sloja u prirodi iznosi 500 m.

Ovakvim izborom mjerila modela i tipova atmosferskog graničnog sloja obuhvaćene su gotovo sve potrebe u praksi.

Budući se kod primjene Counihanove metode ne mogu unaprijed odrediti potrebni parametri (visina i oblik ispuščenja barijere, dimenzije generatora turbulencije, te visina i gustoća raspodjele elemenata podne hrapavosti) koji osiguravaju unaprijed zadani model atmosferskog graničnog sloja, generiran je veći broj modela, od kojih su detaljno analizirani samo oni koji zadovoljavaju postavljene parametre (podudaranje vrijednosti svih relevantnih parametara s rezultatima mjerenja u prirodi prema ESDU - Engineering Science Data Unit).

Za odabrane modele atmosferskog graničnog sloja ($\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35 u mjerilima 1:500, 1:333 i 1:250) uspoređena je struktura istovjetnih graničnih slojeva (zadani α) u sva tri mjerila. Analizirane su razlike u vrijednostima najbitnijih parametara koji karakteriziraju strujanje unutar graničnog sloja:

- osrednjene vrijednosti komponenti brzine strujanja u x smjeru,
- intenzitet turbulencije u x, y i z smjeru,
- tangencijalna komponenta Reynoldsovih naprezanja ($-\overline{\rho u'w'}$),
- integralna duljinska mjera turbulencije u x smjeru,
- spektralna raspodjela kinetičke energije turbulentnih pulzacija u x smjeru.

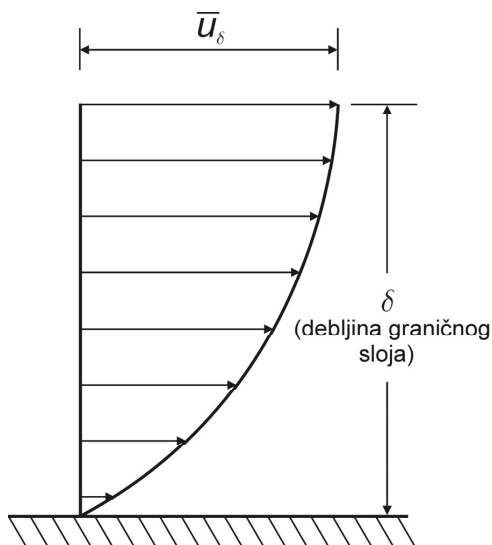
Također su istražene promjene strukture strujanja u promatranom mjerilu za različite modele atmosferskog graničnog sloja (analiza promjena relevantnih parametara strujanja s promjenom α).

Eksperimentalna istraživanja provedena su u zračnom tunelu za generiranje graničnog sloja Katedre za Mehaniku fluida Fakulteta strojarstva Tehničkog Sveučilišta u Münchenu.

2. Osnove

2.1. Atmosferski granični sloj

Atmosferski granični sloj predstavlja dio troposfere unutar kojeg nastaje struktura strujanja zraka u direktnoj interakciji s površinom Zemlje. Uslijed trenja su osrednjene vrijednosti brzine na podlozi jednake nuli i rastu do maksimuma na rubu graničnog sloja, kao što je prema Simiu, Scanlan [26] prikazano na slici 2.1. Pritom su vrijednosti parametara koji karakteriziraju turbulentnu strukturu graničnog sloja maksimalne u blizini podloge i opadaju s povećanjem udaljenosti od podloge.



Slika 2.1: Atmosferski granični sloj, prema Simiu, Scanlan [26]

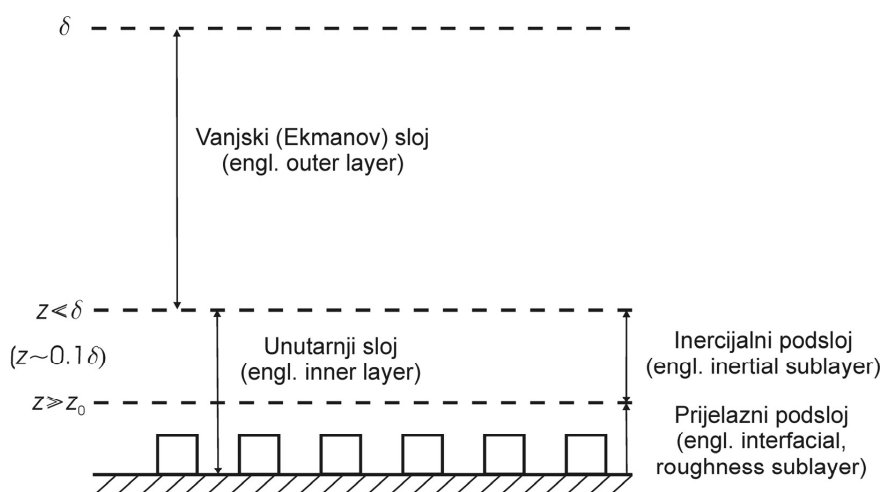
Pojam graničnog sloja je povezan s Froudovim istraživanjima provedenim početkom 1870-tih godina, s ciljem određivanja otpora trenja tanke ploče uronjene u mirujuću vodu. U literaturi se pojam graničnog sloja pojavljuje 1905. godine vezano uz Prandtlova eksperimentalna aerodinamička ispitivanja strujanja fluida male viskoznosti u blizini čvrste stijenke, gdje se također po prvi put spominje prijelaz vanjske neporemećene struje kroz tanki granični sloj do

stanja mirovanja fluida na stijenci. Teorija graničnog sloja je detaljno dana u Schlichting, Gersten [27].

Uobičajeno se atmosferski granični sloj definira kao sloj zraka neposredno uz površinu Zemlje unutar kojeg efekti na površini (trenje, grijanje i hlađenje), vremenskog trajanja kraćeg od jednog dana, uzrokuju izmjenu količine gibanja, energije i mase putem turbulentnog gibanja reda veličine debljine graničnog sloja i manje.

Turbulentna struktura atmosferskog graničnog sloja se razlikuje od turbulentnih struktura generiranih u zračnom tunelu. Turbulencija vezana uz termalnu konvekciju u atmosferi nastaje istovremeno s mehaničkom turbulencijom, čiji uzrok leži u tangencijalnom naprezanju. Nadalje, turbulencija u prirodi nastaje u interakciji s osrednjenom strukturom strujanja, na koju bitno utječe rotacija Zemlje.

Srednja debljina graničnog sloja, kako iznad urbanog, tako i iznad ruralnog pejzaža, iznosi 600 m, prema Counihan [28]. Struktura atmosferskog graničnog sloja ima dosta sličnosti s dvodimenzionalnim turbulentnim graničnim slojem generiranim u zračnom tunelu, pri čemu se oba sastoje od unutarnjeg i vanjskog sloja. Atmosferski granični sloj shematski je, prema Garratt [29], prikazan na slici 2.2.



Slika 2.2: Shematski prikaz strukture atmosferskog graničnog sloja, prema Garratt [29]

Pritom δ predstavlja debljinu graničnog sloja, z je visina iznad podloge, a z_0 aerodinamička duljina hrapavosti. U vanjskom sloju u atmosferi strujanje je većim dijelom neovisno o strukturi podloge, a Coriolisova sila uslijed rotacije Zemlje ima značajnu ulogu. Ovaj sloj se naziva i Ekmanov sloj, budući da je Ekman (1905.) prvi istraživao utjecaj rotacije Zemlje na strukturu atmosferskog graničnog sloja. Unutarnji sloj proteže se od podloge do približno 100 m visine (10-15% debljine graničnog sloja). Strujanje u unutarnjem sloju ovisi uglavnom o strukturi podloge i neovisno je o rotaciji Zemlje. Prijelaz iz unutarnjeg u vanjski sloj nije karakteriziran naglim promjenama strukture strujanja. Unutarnji sloj se dijeli na inercijalni i prijelazni podsloj. U inercijalnom podsloju dominantan mehanizam izmjene energije, količine gibanja i mase predstavljaju turbulentna naprezanja, dok se molekularna difuzija može zanemariti. Profil osrednjene vrijednosti brzine je u skladu s logaritamskim zakonom. Prijelazni podsloj se proteže od podloge do visine neposredno iznad razine krovova građevinskih objekata. U navedenom području na sliku strujanja najvećim dijelom utječe struktura podne hrapavosti, a izmjena energije, količine gibanja i mase se u značajnoj mjeri provodi molekularnom difuzijom.

2.1.1. Struktura strujanja u atmosferskom graničnom sloju

Strujanje u atmosferskom graničnom sloju je turbulentno, a rezultati mjerenja brzine u prirodi u smjeru glavnog strujanja na različitim visinama u odnosu na površinu Zemlje su, prema Dyrbye, Hansen [30], dani na slici 2.3.

Apsolutna brzina (u , v , w) se prikazuje kao suma osrednjene (\bar{u} , \bar{v} , \bar{w}) i pulzirajuće vrijednosti (u' , v' , w') prema sljedećim izrazima:

$$x - \text{smjer} \quad u = \bar{u} + u', \quad (2.1)$$

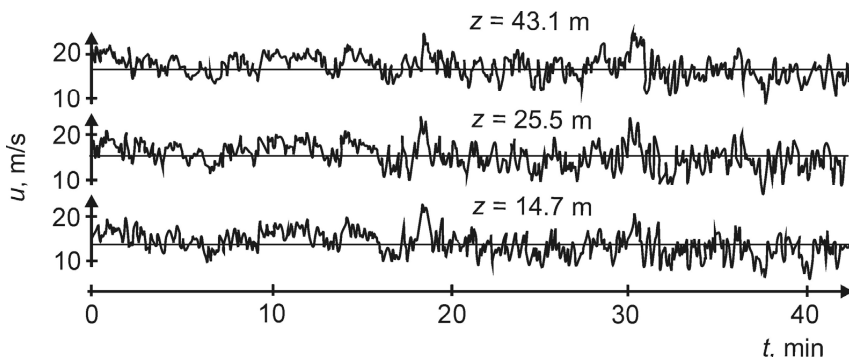
$$y - \text{smjer} \quad v = \bar{v} + v', \quad (2.2)$$

$$z - \text{smjer} \quad w = \bar{w} + w', \quad (2.3)$$

pri čemu je npr. osrednjena vrijednost brzine u x smjeru definirana izrazom

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} u(t - \tau) d\tau, \quad (2.4)$$

pri čemu T predstavlja duljinu trajanja akvizicije.



Slika 2.3: Brzine strujanja zraka u smjeru glavnog strujanja unutar atmosferskog graničnog sloja, prema Dyrbye, Hansen [30]

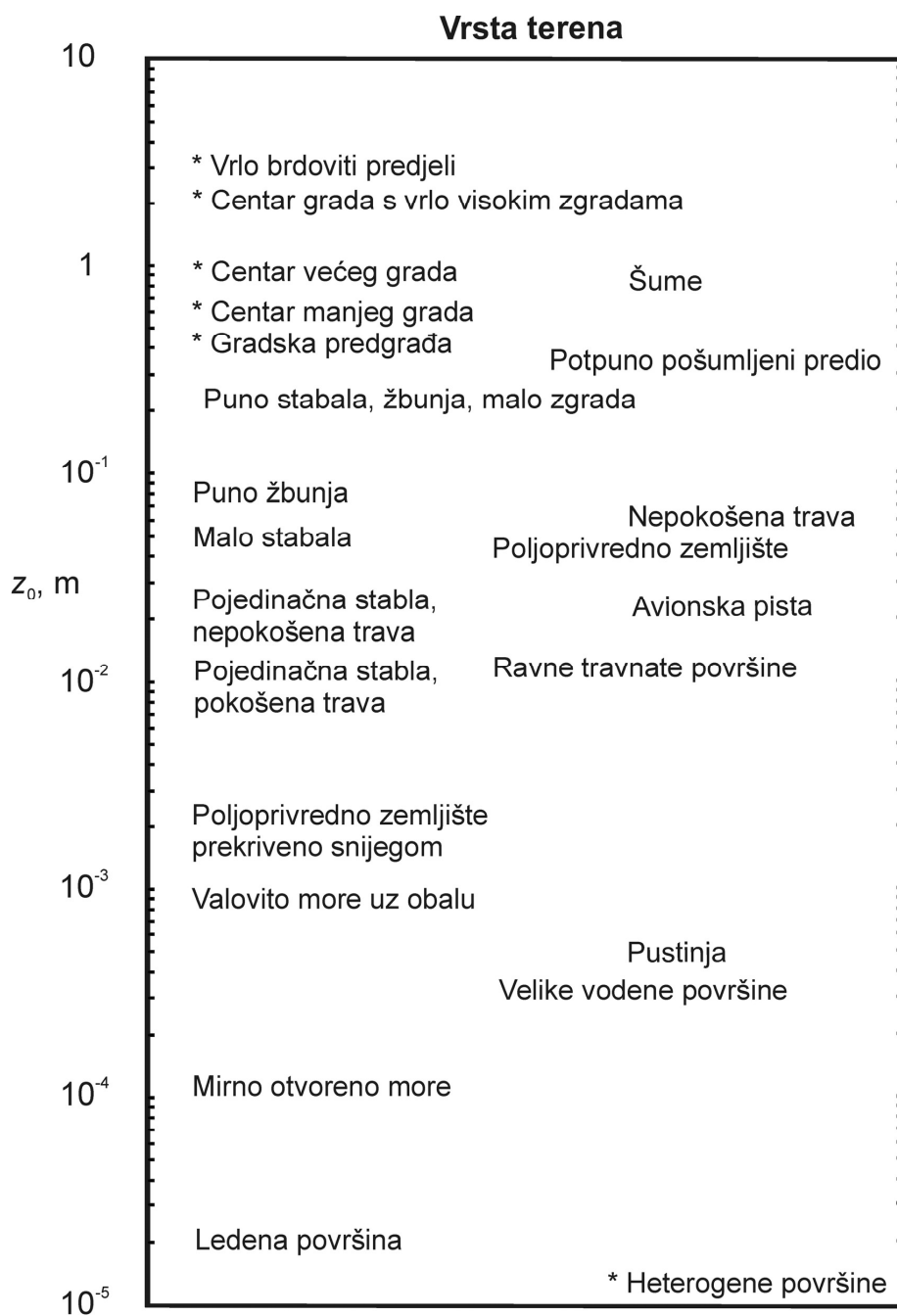
Pritom su smjerovi brzine u , v i w u uzdužnom, poprečnom i vertikalnom smjeru definirani u skladu s pravilom desne ruke. Strujanje unutar atmosferskog graničnog sloja je trodimenzionalno, pri čemu je $\bar{u} \gg \bar{v}$ i $\bar{u} \gg \bar{w}$, tako da se komponente brzine \bar{v} i \bar{w} prilikom analize rezultata eksperimentalnih istraživanja u zračnom tunelu mogu zanemariti.

Strujanjem zraka iznad dovoljno duge ravne podloge (dulje od 5 – 10 km), uz homogenu strukturu hrapavosti, uspostavlja se ravnotežni granični sloj. Vertikalna raspodjela osrednjene brzine u smjeru glavnog strujanja (x smjer) unutar graničnog sloja se definira zakonom potencije oblika

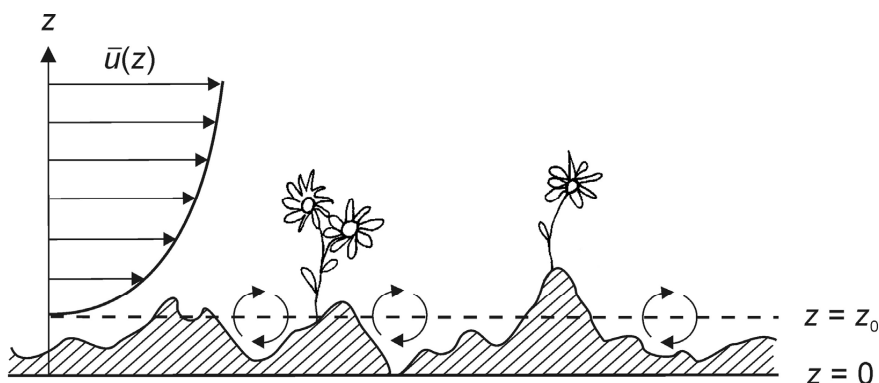
$$\frac{\bar{u}_z}{\bar{u}_{\text{ref}}} = \left(\frac{z-d}{z_{\text{ref}}-d} \right)^\alpha = \left(\frac{\tilde{z}}{\tilde{z}_{\text{ref}}} \right)^\alpha. \quad (2.5)$$

Iznos osrednjene vrijednosti brzine ovisi o visini iznad tla i hrapavosti podloge. Podna hrapavost se opisuje aerodinamičkim duljinom hrapavosti z_0 , koja je određena visinom, oblikom, te gustoćom i načinom raspodjele elemenata podne hrapavosti. S povećanjem hrapavosti podloge, tj. s povišenjem pojedinih građevina i sličnih prepreka, smanjuje se porast osrednjene vrijednosti brzine s porastom visine iznad tla. Ovisnost aerodinamičke duljine hrapavosti z_0 o strukturi podloge dana je na slici 2.4, prema ESDU [31].

Ukoliko su objekti na podlozi rijetko raspoređeni, može se pojednostavljeno uzeti da je područje valjanosti zakona potencije od dimenzije z_0 do gornjeg ruba graničnog sloja, prikazano prema Dyrbye, Hansen [30] na slici 2.5.



Slika 2.4: Ovisnost iznosa aerodinamičke duljine hrapavosti z_0 o strukturi podloge, prema ESDU [31]



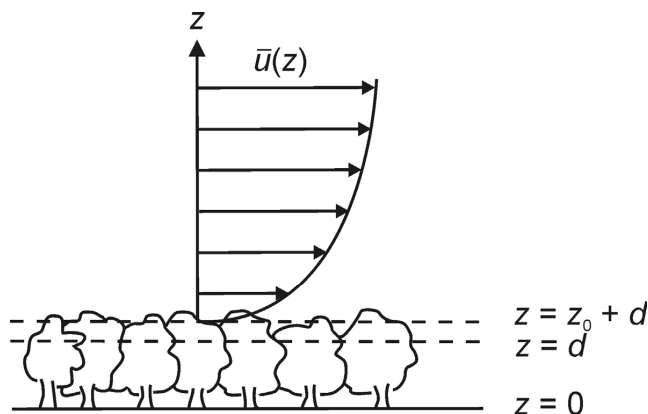
Slika 2.5: Pojednostavljeni prikaz područja valjanosti zakona potencije u slučaju rijetko raspoređenih objekata na podlozi, prema Dyrbye, Hansen [30]

U praksi je međutim češći slučaj da su objekti na podlozi gusto raspoređeni. Strujanje zraka u blizini tla je u navedenom slučaju vrlo složeno, te je smjer i iznos brzine u ovom području vrlo teško odrediti. Kao posljedica je struja zraka istisnuta od podloge i formira se „nova“ podloga u visini objekata. Stoga se zakon potencije primjenjuje tek u području iznad objekata smještenih na podlozi. Ova se visina naziva debljina istisnuća i označava slovom d . Točno određivanje debljine istisnuća nije moguće, ali se prema ESDU [32] može prihvatiti da je debljina istisnuća jednaka visini okolnih zgrada ($d = h$). WTG [33] navodi mogućnost računanja visine istisnuća kao 75% visine okolnih zgrada ($d = 0.75h$). Na slici 2.6 je dan primjer profila osrednjenih vrijednosti brzine u smjeru glavnog strujanja iznad šume, pri čemu je naglašena debljina istisnuća i područje primjene zakona potencije. U blizini tla, do približno 100 m visine, profil osrednjene brzine u smjeru glavnog strujanja može se također prema Thuiller i dr. [34] definirati logaritamskim zakonom:

$$\frac{\bar{u}_z}{u_r} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right), \quad (2.6)$$

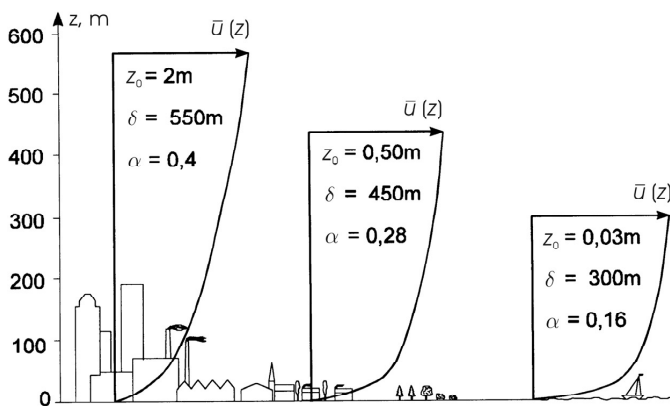
odnosno

$$\frac{\bar{u}_z}{\bar{u}_{\text{ref}}} = \frac{\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right)}{\ln \left(\frac{z_{\text{ref}}-d}{z_0} \right)}, \quad (2.7)$$



Slika 2.6: Područje valjanosti zakona potencije u slučaju gusto raspoređenih objekata na podlozi (šuma), prema Dyrbye, Hansen [30]

pri čemu se za standardnu vrijednost von Kármánove konstante usvaja $\kappa = 0.4$, dok rezultati eksperimenata u atmosferi daju bolje rezultate za vrijednost $\kappa = 0.35$, prema Businger i dr. [35]. Konačni sud o optimalnom iznosu ove konstante pri modeliranju atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu još nije donesen, prema Panofsky [36]. Na slici 2.7 je, prema Pernpeintner [37], dan prikaz profila osrednjenih vrijednosti brzine unutar atmosferskog graničnog sloja koji nastaje strujanjem zraka iznad različitih tipova podloga, uz pripadajuće vrijednosti aerodinamičke duljine hrapavosti z_0 , debljine graničnog sloja δ i eksponenta zakona potencije α .



Slika 2.7: Profili osrednjenih vrijednosti brzine, prema Pernpeintner [37]

2.1.2. Atmosferska turbulencija

Strujanje zraka unutar atmosferskog graničnog sloja je turbulentno. Podaci o svojstvima atmosferske turbulencije iznimno su važni u industrijskoj aerodinamici iz tri glavna razloga:

- Krute konstrukcije izložene su nestacionarnim opterećenjima uslijed atmosferske turbulencije,
- Vibracije se pojačavaju u području rezonancije fleksibilnih konstrukcija uslijed pulzacija brzine strujanja,
- Ponašanje konstrukcija s aspekta aerodinamike i rezultati eksperimentalnih istraživanja u laboratorijskim uvjetima su direktno uvjetovani strukturom turbulencije.

Struktura atmosferske turbulencije opisuje se na temelju vrijednosti nekoliko ključnih parametara, kao što su intenzitet turbulencije, integralna duljinska mjera turbulencije, spektar kinetičke energije turbulentnih pulzacija brzine i Reynoldsovo naprezanje.

Intenzitet turbulencije

Osnovni parametar kojim se opisuje atmosferska turbulencija je intenzitet turbulencije. Neka $u'(z)$ predstavlja pulzacije brzine u smjeru glavnog strujanja na visini z u odnosu na podlogu. Intenzitet turbulencije u smjeru glavnog strujanja se definira kao

$$I_u(z) = \frac{\sqrt{\overline{u'^2(z)}}}{\bar{u}_{\text{ref}}}, \quad (2.8)$$

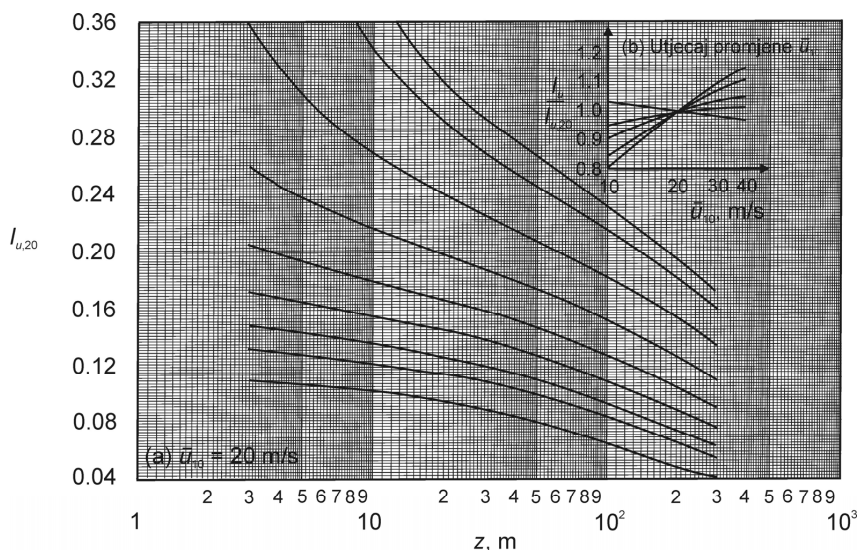
pri čemu je \bar{u}_{ref} osrednjena vrijednost brzine u smjeru glavnog strujanja na referentnoj visini (uobičajeno brzina na visini mjernog mjesta, na gornjem rubu graničnog sloja ili u visini ispitivanog modela). Slično se definiraju i intenziteti turbulencije u poprečnom i vertikalnom smjeru

$$I_v(z) = \frac{\sqrt{\overline{v'^2(z)}}}{\bar{u}_{\text{ref}}}, \quad I_w(z) = \frac{\sqrt{\overline{w'^2(z)}}}{\bar{u}_{\text{ref}}}. \quad (2.9)$$

Rezultati mjerenja iz prirode pri neutralnim atmosferskim uvjetima, prema ESDU [31], su prikazani na slici 2.8, pri čemu su intenziteti turbulencije I_u , I_v i I_w

istovremeno mjereni. Potvrđena je činjenica da su odnosi I_v/I_u i I_w/I_u u blizini tla konstantni, tj. prema Counihan [28], vrijede sljedeći odnosi

$$\frac{I_v}{I_u} = 0.75 \quad \text{i} \quad \frac{I_w}{I_u} = 0.50. \quad (2.10)$$



Slika 2.8: Intenzitet turbulencije u prirodi, prema ESDU [31]

Intenzitet turbulencije $I_{u,20}$ je određen pri $\bar{u}_{10} = 20$ m/s na visini $z = 10$ m i normiran s osrednjenim vrijednostima brzine na visini mjernog mjesta $\bar{u}(z)$, primjer (a). Na maloj slici, primjer (b), je prikazan utjecaj vrijednosti brzine \bar{u}_{10} na vrijednosti intenziteta turbulencije I_u .

Integralna duljinska mjera turbulencije

Pulzirajuće strujanje u turbulentnom graničnom sloju može se razmatrati kao zbroj pojedinih vrtloga nošenih osrednjenom brzinom strujanja. Svaki vrtlog uzrokuje u promatranoj točki periodičku pulzaciju kružne frekvencije $\omega = 2\pi f$, pri čemu f predstavlja frekvenciju. U skladu s tim je moguće definirati valnu duljinu vrtloga kao $\lambda = \bar{u}/f$, pri čemu je $k_w = 2\pi/\lambda$ valni broj vrtloga. Valna duljina predstavlja mjeru za veličinu vrtloga. Integralne duljinske mjere turbulencije su mjere za prosječnu veličinu turbulentnih vrtloga struje zraka na

određenoj poziciji. Ukupno postoji 9 integralnih duljinskih mjera turbulencije (3 dimenzije vrtloga uz 3 smjera pulzirajuće brzine u , v i w). $L_{u,x}$, $L_{u,y}$ i $L_{u,z}$ predstavljaju tako prosječne veličine vrtloga u uzdužnom, poprečnom i vertikalnom smjeru uzrokovane pulzacijama brzine u uzdužnom smjeru. Najvažnija integralna duljinska mjera turbulencija definira dimenziju vrtloga u x smjeru uslijed pulzacija brzine u x smjeru ($L_{u,x}$). Matematički se $L_{u,x}$, prema Sockel [45], može definirati prostornim korelacijama kao

$$L_{u,x} = \int_0^{\infty} R_{u,x}(\Delta x) d\Delta x, \quad (2.11)$$

pri čemu je

$$R_{u,x}(\Delta x) = \frac{\overline{u_1'(t) \cdot u_2'(t)}}{\sqrt{\overline{u_1'^2}} \sqrt{\overline{u_2'^2}}}, \quad (2.12)$$

gdje indeksi 1 i 2 označavaju dvije različite točke u prostoru. Integralne duljinske mjere turbulencije moguće je definirati i primjenom vremenskih korelacija uzimajući u obzir Taylorovu hipotezu „zamrznute“ turbulencije (pulzacije brzine se gibaju osrednjenom brzinom strujanja glavne struje). Tada vrijedi

$$R_{u,x}(\Delta x) = \frac{\overline{u_1'(t) \cdot u_1'(t - \Delta t)}}{\overline{u_1'^2}} = R_{u,x}(\Delta t); \quad \Delta t = \frac{\Delta x}{\bar{u}}, \quad (2.13)$$

i

$$L_{u,x} = \int_0^{\infty} R_{u,x}(\Delta t) d\Delta t. \quad (2.14)$$

U ovom radu su integralne duljinske mjere turbulencije određene uz primjenu vremenskih korelacija.

Spektar kinetičke energije turbulencije

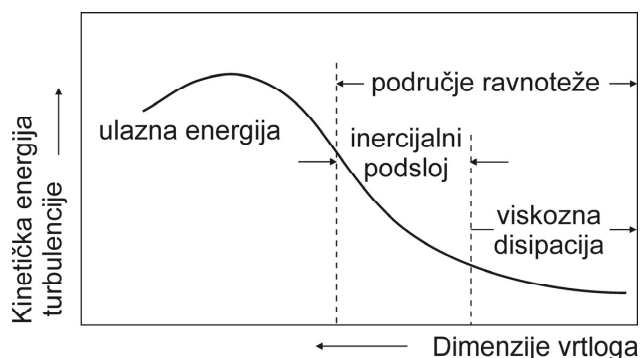
Može se pretpostaviti da su turbulentne pulzacije brzine uzrokovane superpozicijom vrtloga različitih dimenzija. Ukupna kinetička energija turbulentnog gibanja nastaje zbrajanjem kinetičke energije pojedinih vrtloga. Spektar kinetičke energije turbulencije je funkcija ovisnosti kinetičke energije o valnoj duljini vrtloga. U praktičnoj primjeni proučava se najčešće spektar kinetičke energije turbulencije u x smjeru, koji se definira izrazom

$$\overline{u'^2} = \int_0^{\infty} S_u(f) df, \quad (2.15)$$

gdje su $S_u(f)$ amplitude pulzacije brzine u pri frekvenciji f . Strujanjem zraka iznad hrapave podloge nastaje specifična struktura strujanja sastavljena od turbulentnih vrtloga određene veličine, koji se raspadaju na sve manje i manje vrtloge. Ovim raspadom se energija prenosi s velikih na manje vrtloge, a raspadom najmanjih vrtloga se kinetička energija pretvara u toplinu. Ovaj proces predstavlja tzv. kaskadni proces transporta energije. Najveći turbulentni vrtlozi nisu pritom najbogatiji energijom. Vrtlozi najbogatiji energijom nešto su manjih dimenzija u odnosu na najveće vrtloge. U srednjem dijelu spektra, pri frekvencijama višim od onih kod kojih vrijednosti kinetičke energije turbulencije dosežu maksimalnu vrijednost, dominantnu ulogu imaju inercijalne sile. U tom području vrijedi zakon Kolmogorova,

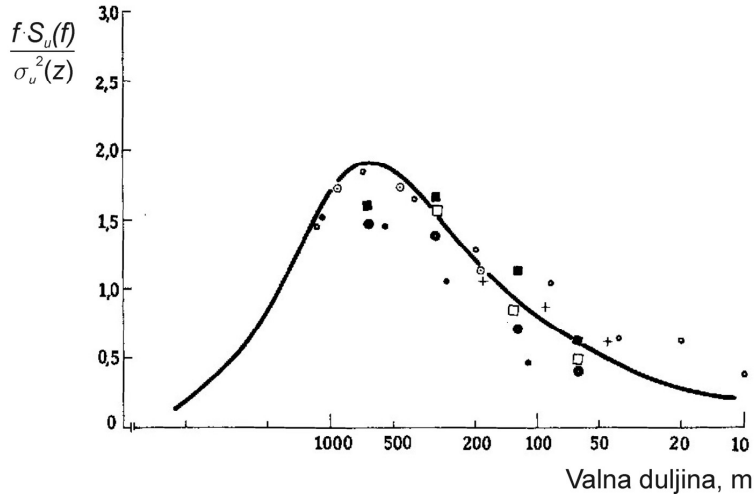
$$S_u(f) \approx k_w^{-\frac{5}{3}}, \quad (2.16)$$

pri čemu k_w predstavlja valni broj vrtloga. U ovom području se energetski nivo smanjuje sa smanjenjem dimenzija vrtloga. Područje najviših frekvencija, odnosno najmanjih vrtloga, predstavlja tzv. zonu disipacije. U tom području dolazi do najbrže pretvorbe kinetičke energije u toplinu. Zona disipacije se ne proučava u području industrijske aerodinamike. Detaljan prikaz kaskadnog procesa dan je u Landau, Lifshitz [38]. Shematski prikaz strukture spektra kinetičke energije turbulencije, prema Garratt [29], dan je na slici 2.9.



Slika 2.9: Shematski prikaz strukture spektra kinetičke energije turbulencije, prema Garratt [29]

Primjer spektra kinetičke energije turbulencije u smjeru glavnog strujanja dan je na slici 2.10, prema Davenport [39].



Slika 2.10: Spektar kinetičke energije turbulencije u smjeru glavnog strujanja; usporedba empirijske krivulje s rezultatima eksperimenata, prema Davenport [39]

Na temelju usporedbe rezultata teoretskih istraživanja s rezultatima iz prirode Pröpper [40] je ustanovio da izraz Kolmogorova za raspodjelu kinetičke energije turbulencije u modeliranom atmosferskom graničnom sloju pokazuje vrlo dobru podudarnost s rezultatima mjerenja iz prirode

$$\frac{f \cdot S_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4 \cdot X_u}{(1 + 70.78 \cdot X_u^2)^{\frac{5}{6}}}, \quad (2.17)$$

pri čemu je $\sigma_u = \sqrt{u'^2}$. (2.18)

Bezdimenzijska frekvencija je definirana izrazom

$$X_u = \frac{f \cdot L_{u,x}(z)}{\bar{u}(z)}, \quad (2.19)$$

a integralna duljinska mjera turbulencije

$$L_{u,x} = \frac{0.146 \cdot \bar{u}(z)}{f_m}. \quad (2.20)$$

Pritom f_m predstavlja frekvenciju, pri kojoj izraz $f \cdot S_u(f)$ postiže maksimalnu vrijednost, a određuje se mjerenjem.

Reynoldsovo naprezanje

Na mjestu dodira struje zraka i podloge nastaju sile trenja, koje se u gornje slojeve graničnog sloja prenose putem tangencijalnih naprezanja. Tangencijalna naprezanja jednaka su zbroju viskoznih i turbulentnih naprezanja,

$$\tau = \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \rho \overline{u'w'}. \quad (2.21)$$

Iznosi viskoznih naprezanja $\tau = \mu(\partial \bar{u}/\partial z)$ su maksimalni na podlozi, naglo opadaju s udaljavanjem od podloge i u inercijalnom podsloju su zanemarivo mali u odnosu na iznose turbulentnih naprezanja $-\rho \overline{u'w'}$. Iznosi turbulentnih (Reynoldsovih) tangencijalnih naprezanja su na stijenci jednaki nuli i naglo rastu s udaljavanjem od podloge. Unutar inercijalnog podsloja su prema rezultatima istraživanja u prirodi ESDU [41] približno konstantni. U vanjskom sloju turbulentna naprezanja opadaju s udaljavanjem od podloge i na gornjem rubu graničnog sloja su jednaka nuli. U području industrijske aerodinamike se uglavnom razmatraju turbulentna (Reynoldsova) tangencijalna naprezanja. Definiraju se korelacijama $\overline{u'v'}$, $\overline{v'w'}$ i $\overline{u'w'}$ i jednaka su nuli ukoliko je turbulencija izotropna, tj. ukoliko su karakteristike strujanja neovisne o smjeru. Unutar atmosferskog graničnog sloja je strujanje anizotropno, a u praktičnoj primjeni se iznosi korelacija $\overline{u'v'}$ i $\overline{v'w'}$ mogu zanemariti, u skladu s rezultatima mjerenja iz prirode, prema ESDU [31]. Reynoldsovo tangencijalno naprezanje se, prema ESDU [31], definira izrazom

$$\tau = -\rho \overline{u'w'} = \rho u_\tau^2 (1 - z/\delta)^2. \quad (2.22)$$

Od površine Zemlje do 300 m visine vrijedi, također prema ESDU [31],

$$\frac{-\overline{u'w'}}{\sigma_u \sigma_w} \approx \frac{u_\tau^2 (1 - 2z/\delta)}{\sigma_u (\sigma_w/\sigma_u) \sigma_u} = \frac{1 - 2z/\delta}{(\sigma_u/u_\tau)^2 (\sigma_w/\sigma_u)}, \quad (2.23)$$

pri čemu je $\sigma_w/\sigma_u \approx 0.55$. σ_u/u_τ se definira izrazom (2.24), pod uvjetom da se atmosferski granični sloj nalazi u stanju ravnoteže,

$$I_u = \frac{\sigma_u}{u_T} \frac{u_T}{V_\infty}. \quad (2.24)$$

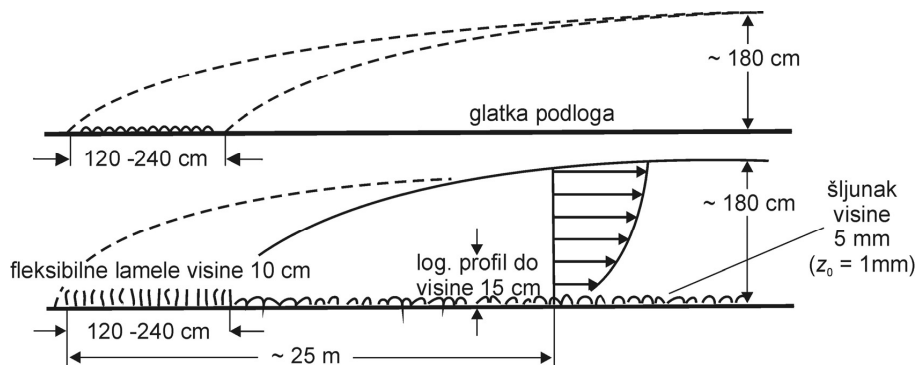
Predznaci naprezanja $\overline{\rho u'w'}$ se definiraju u skladu sa Schlichting, Gersten [27]: "Čestica fluida koja se giba vertikalno prema gore (u pozitivnom smjeru) impulsom w' dolazi iz područja s manjom brzinom \bar{u} . Budući da čestica zadržava svoju originalnu (manju) brzinu \bar{u} ona uzrokuje negativnu pulzaciju u' u gornjem sloju. Obratno čestice koje putuju prema dolje (u negativnom smjeru impulsom $-w'$), iz područja s većom brzinom \bar{u} u područje s manjom brzinom uzrokuju pozitivnu pulzaciju u' struje zraka." Stoga su vrijednosti Reynoldsovog naprezanja $\overline{\rho u'w'}$, koje povezuje istovremene pulzacije struje zraka u uzdužnom i vertikalnom smjeru, negativne.

2.2. Generiranje modela atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu

Postoji nekoliko metoda generiranja modela atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu. One se razlikuju po duljini mjerne sekcije i izboru objekata za generiranje strukture strujanja.

2.2.1. Zračni tuneli s dugom mjernom sekcijom

Atmosferski granični sloj može nastati strujanjem zraka iznad podloge prekrivene elementima podne hrapavosti bez dodatnih objekata. Primjer je metoda razvijena na Colorado State University prikazana na slici 2.11, prema Plate [42]. Na ovaj način se generira vremenski osrednjena i turbulentna struktura koja je slična strukturi atmosferskog graničnog sloja. Mjerilo u kojem se provodi modeliranje se određuje usporedbom aerodinamičke duljine hrapavosti z_0 ili integralne duljinske mjere turbulencije u uzdužnom smjeru $L_{u,x}$ na modelu i u prirodi. Uobičajena mjerila su od 1:1000 do 1:500. Debljina graničnog sloja δ se povećava vrlo sporo, tako da pri simulaciji strujanja iznad nenaseljenog područja nakon nastrujne sekcije duljine 20 m debljina graničnog

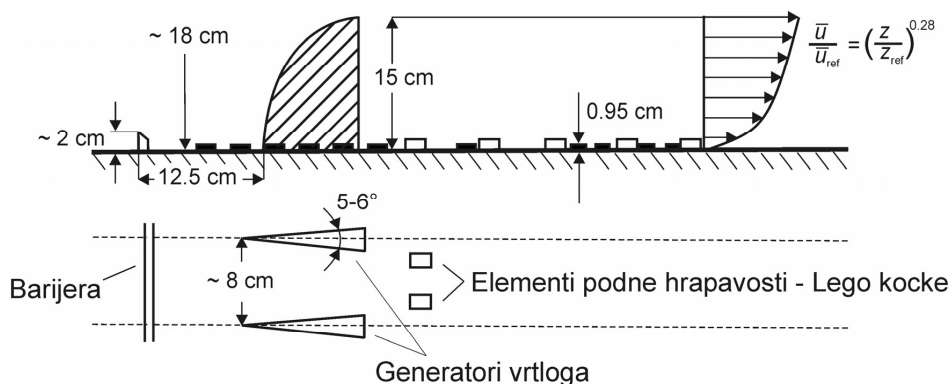


Slika 2.11: Generiranje graničnog sloja s dugom mjernom sekcijom (Colorado State University), prema Plate [42]

sloja iznosi 400 mm. Paralelno s generiranjem graničnog sloja na podlozi nastaju i granični slojevi na stropu i bočnim zidovima mjerne sekcija, što dovodi do dodatnog smanjenja presjeka mjerne sekcije pogodnog za provedbu modelskih ispitivanja. Iz navedenih razloga se zračni tuneli s dugom mjernom sekcijom rijetko koriste.

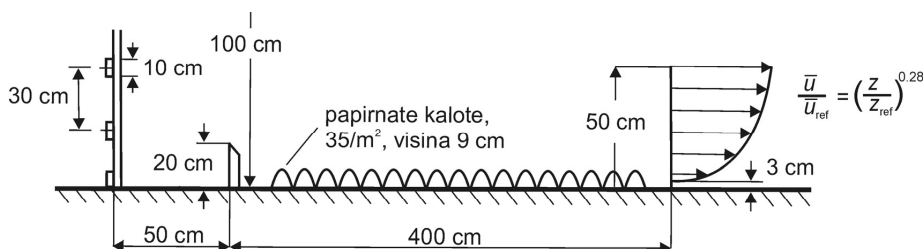
2.2.2. Zračni tuneli s kratkom mjernom sekcijom

Zbog manjih dimenzija i veće upotrebljivosti se zračni tuneli za modeliranje atmosferskog graničnog sloja u većini slučajeva izvode s kratkom mjernom sekcijom. Da bi bilo moguće generiranje odgovarajuće debljine graničnog sloja na kratkoj mjernoj sekciji koriste se uz podnu hrapavost i odgovarajući objekti. Pritom su granični slojevi na stropu i bočnim zidovima mjerne sekcija bitno tanji u odnosu na granične slojeve koji nastaju kod zračnih tunela s dugom mjernom sekcijom, pa je presjek mjerne sekcije pogodan za provedbu modelskih ispitivanja značajno veći. Kod svih metoda se sustav za generiranje graničnog sloja sastoji od tri komponente: barijere, podne hrapavosti i objekata za intenziviranje miješanja struje zraka. Kod Counihanove metode se za početno generiranje turbulentne strukture primjenjuju generatori vrtloga elipsoidnog oblika, prikazano na slici 2.12, prema Plate [42]. Kod Cookove metode se za

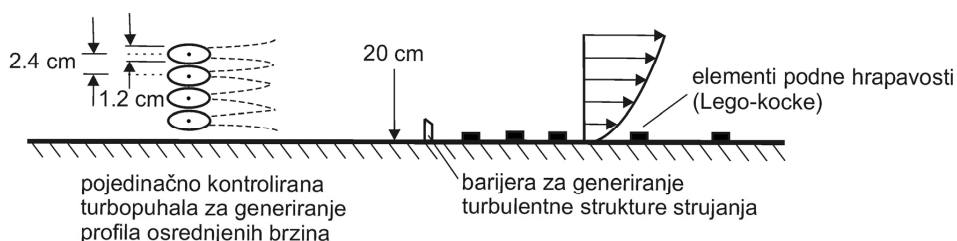


Slika 2.12: Counihanova metoda generiranja graničnog sloja, prema Plate [42]

intenziviranje miješanja struje zraka primjenjuje mreža, prikazano na slici 2.13, prema Plate [42]. Ova je metoda posebno pogodna pri simulaciji donjeg dijela atmosferskog graničnog sloja u manjim zračnim tunelima. Teunissenova metoda upuhavanja zraka uz primjenu zračnih turbopuhala, prema Plate [42], je prikazana na slici 2.14. Koristi se pri generiranju graničnog sloja u mjerilima



Slika 2.13: Cookova metoda generiranja graničnog sloja, prema Plate [42]



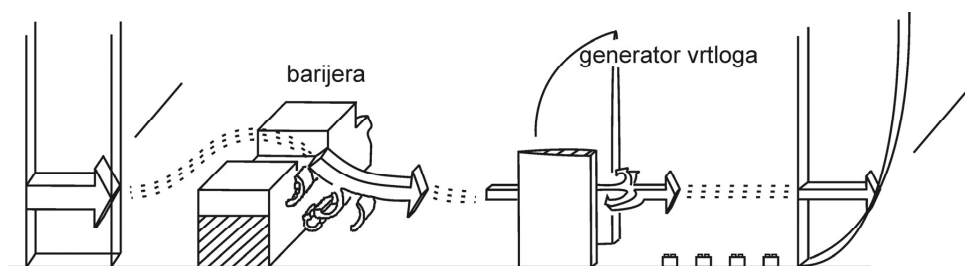
Slika 2.14: Teunissenova metoda generiranja graničnog sloja, prema Plate [42]

nepovoljnim za ispitivanje opterećenja na samostojećim obiteljskim stambenim objektima. Primjenom ove metode se mogu vrlo dobro generirati profili osrednjenih brzina. Pritom mehanizam generiranja strukture turbulencije ne odgovara uvjetima nastanka turbulencije u prirodi, što onemogućava generiranje odgovarajuće turbulentne strukture strujanja u zračnom tunelu ukoliko se primjenjuje Teunissenova metoda.

Kod svih navedenih metoda modeliranja atmosferskog graničnog sloja u zračnim tunelima s kratkom mjernom sekcijom strukturu profila osrednjenih brzina u x smjeru i profile intenziteta turbulencije u najvećoj mjeri određuje visina i gustoća raspodjele elemenata podne hrapavosti. Barijera i objekti za generiranje strukture turbulencije graničnog sloja skraćuju duljinu mjerne sekcije potrebnu za zadovoljavajuće modeliranje atmosferskog graničnog sloja. Barijera doprinosi naglom gubitku iznosa količine gibanja u donjem dijelu graničnog sloja. Ona je u velikom broju slučajeva propusna ili je gornji brid izveden "nazubljeno", da bi se skratilo područje neizobraženog strujanja iza barijere. Visina i oblik barijere određuju iznos gubitka količine gibanja u donjem dijelu graničnog sloja. Povišenjem barijere uz jednaki raspored podne hrapavosti i objekata koji pridonose bržem rastu debljine graničnog sloja povećava se debljina graničnog sloja i integralna duljinska mjera turbulencije. Pri većim mjerilima modeliranja atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu nije moguće modelirati kompletan granični sloj, već samo njegov donji dio, što je u velikoj većini slučajeva dostatno. Uobičajena mjerila modeliranja atmosferskog graničnog sloja u zračnim tunelima s kratkom mjernom sekcijom su od 1:1000 do 1:100.

2.2.3. Counihanova metoda

Dosadašnja iskustva pokazuju da se uz primjenu Counihanove metode rezultati dobiveni u zračnom tunelu najbolje podudaraju s rezultatima mjerenja iz prirode, pa se navedena metoda koristi i u okviru ovog rada. Stoga je princip generiranja graničnog sloja Counihanovom metodom [2], [3], [4] detaljnije objašnjen i prikazan na slici 2.15, prema Wanninger [43]. Na izlazu iz sapnice i ulazu u



Slika 2.15: Princip generiranja graničnog sloja Counihanovom metodom, prema Wanninger [43]

mjernu sekciju zračnog tunela postavljena je nazubljena barijera. Strujanjem zraka preko barijere nastaju vrtlozi s horizontalnom osi vrtnje. Nizvodno od barijere smješteni su generatori vrtloga, koji potiču nastajanje vrtloga s vertikalnom osi vrtnje. Izborom odgovarajuće visine i gustoće elemenata podne hrapavosti modelira se struktura donjeg dijela graničnog sloja. Na udaljenosti 3-4 debljine graničnog sloja δ nizvodno od generatora vrtloga granični sloj je potpuno razvijen i nalazi se u stanju ravnoteže.

2.3. Sličnost strujanja

U svakom modelskom ispitivanju se traži zadovoljenje kriterija sličnosti u odnosu na prototipnu pojavu. Za slučaj da nije moguće zadovoljiti sve kriterije sličnosti, kriteriji se zadovoljavaju po važnosti utjecaja. U nastavku su dane osnovne jednadžbe koje opisuju strujanje u atmosferskom graničnom sloju, a iz kojih se definiraju kriteriji sličnosti.

2.3.1. Osnovne jednadžbe

Struktura strujanja u atmosferskom graničnom sloju opisuje se jednadžbama kontinuiteta i količine gibanja. Polazne pretpostavke su:

- a) Konstantna viskoznost zraka ($\mu = \text{konst.}$),

b) Vrijedi Boussinesqova pretpostavka (promjene gustoće zraka su zanemarive u svim članovima, osim u uzgonskom članu). Polje tlaka se može prikazati u obliku:

$$p = p_0 + p_r; \quad p_0 = -\rho_0 g x_3 + \text{konst.} \quad (2.25)$$

pri čemu vrijedi

$$\frac{\partial p}{\partial x_1} = \frac{\partial p_r}{\partial x_1}; \quad \frac{\partial p}{\partial x_2} = \frac{\partial p_r}{\partial x_2}; \quad \frac{\partial p}{\partial x_3} = -\rho_0 g + \frac{\partial p_r}{\partial x_3}, \quad (2.26)$$

što prikazano u indeksnoj notaciji daje

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial p_r}{\partial x_i} - \rho_0 g \delta_{i3}. \quad (2.27)$$

Pritom p predstavlja apsolutni tlak, p_0 hidrostatski tlak a p_r njihovu razliku.

c) Coriolisova sila se definira izrazom

$$\vec{F}^c = 2 \cdot (\vec{u} \times \vec{\Omega}) \cdot m, \quad (2.28)$$

a masena gustoća Coriolisove sile

$$\vec{f}^c = \frac{\vec{F}^c}{m} = 2 \cdot (\vec{u} \times \vec{\Omega}), \quad (2.29)$$

tj. u indeksnoj notaciji

$$f_i^c = 2\epsilon_{ijk} u_j \Omega_k. \quad (2.30)$$

Kutna brzina Zemlje ω i lokalna kutna brzina na poziciji na kojoj se provode eksperimenti prikazane su na slici 2.16, pri čemu su s Ω_i označene komponente kutne brzine Zemlje ω u lokalnom koordinatnom sustavu. Budući da je zračni tunel u kojem se provode eksperimenti smješten u smjeru sjever-jug, kao što je prikazano na slici 2.17, komponente kutne brzine mogu se definirati kao

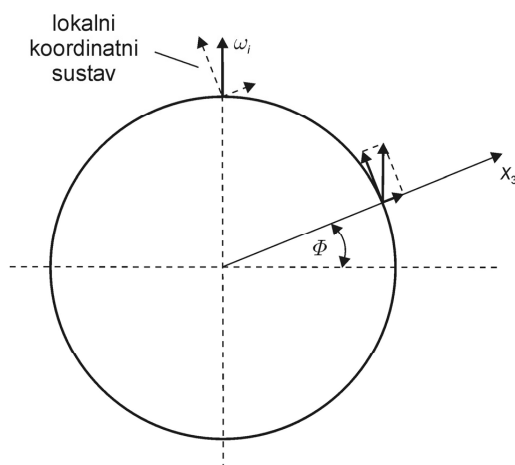
$$\Omega_1 = -\omega \cdot \cos \Phi, \quad \Omega_2 = 0, \quad \Omega_3 = \omega \cdot \sin \Phi. \quad (2.31)$$

Ukupna masena sila predstavlja zbroj gravitacijske i Coriolisove sile

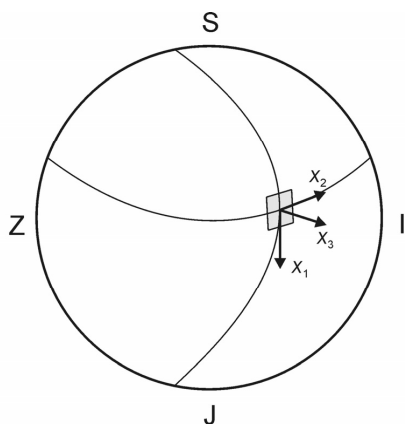
$$f_i = -g\delta_{i3} + 2\epsilon_{ijk} u_j \Omega_k. \quad (2.32)$$

U skladu s polaznim pretpostavkama jednadžba kontinuiteta se definira u obliku

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (2.33)$$



Slika 2.16: Kutna brzina rotacije Zemlje



Slika 2.17: Lokalni koordinatni sustav

a jednadžba količine gibanja kao

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho f_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]. \quad (2.34)$$

Uz uvedene pretpostavke

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} = -\frac{\partial p_r}{\partial x_i} + \rho_0 g \delta_{i3} \quad (2.35)$$

i

$$\rho f_i = -\rho g \delta_{i3} + 2\rho \varepsilon_{ijk} u_j \Omega_k, \quad (2.36)$$

vrijedi

$$\underbrace{\rho \frac{\partial u_i}{\partial t}}_{\text{Lokalno ubrzanje}} + \underbrace{\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}_{\text{Konvekcijsko ubrzanje}} = - \underbrace{\frac{\partial p_r}{\partial x_i}}_{\text{Gradijent tlaka}} + \underbrace{(\rho_0 - \rho)g\delta_{i3}}_{\text{Uzgonska sila}} + \underbrace{2\rho\varepsilon_{ijk}u_j\Omega_k}_{\text{Coriolisova sila}} + \underbrace{\mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}}_{\text{Viskozne sile}}. \quad (2.37)$$

Da bi se ostvarila sličnost strujanja kod modela i prototipa potrebno je postići identičnost bezdimenzijskih jednadžbi i bezdimenzijskih rubnih uvjeta dviju pojava. Za potrebe definiranja kriterija sličnosti osnovne jednadžbe su prikazane u bezdimenzijskom obliku. Stoga se dimenzijske varijable definiraju pomoću referentnih veličina i bezdimenzijskih varijabli u obliku:

- $\rho = \rho_0 \tilde{\rho}$,
- $u_i = u_R \tilde{u}_i$,
- $p_r = \rho_0 u_R^2 \tilde{p}_R$,
- $g = g_R \tilde{g}$,
- $\Omega_k = \omega \tilde{\Omega}_k$,
- $\mu = \mu_R \tilde{\mu}$,
- $t = t_R \tilde{t}$,
- $x_i = L_R \tilde{x}_i$.

Uvođenjem prethodnih relacija u jednadžbe kontinuiteta i količine gibanja proizlazi

$$\frac{u_R}{L_R} \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial \tilde{x}_j} = 0 \quad \text{odnosno} \quad \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial \tilde{x}_j} = 0, \quad (2.38)$$

i

$$\begin{aligned} \frac{L_R}{u_R t_R} \tilde{\rho} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial \tilde{t}} + \tilde{\rho} \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial \tilde{x}_j} = \\ = \frac{\partial \tilde{p}_R}{\partial \tilde{x}_i} + \frac{g_R L_R}{u_R^2} (1 - \tilde{\rho}) \tilde{g} \delta_{i3} + \frac{L_R \omega}{u_R} 2 \tilde{\rho} \varepsilon_{ijk} \tilde{u}_j \tilde{\Omega}_k + \frac{\mu_R}{\rho_0 L_R u_R} \tilde{\mu} \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial \tilde{x}_j \partial \tilde{x}_j}, \end{aligned} \quad (2.39)$$

pri čemu su sve bezdimenzijske veličine označene povlakom identične na modelu i prototipu. Sličnost strujanja kod modela i prototipa će biti postignuta uz iste jednadžbe i početne i rubne uvjete koji definiraju ta bezdimenzijska rješenja. Jednadžba kontinuiteta (2.38) će bezuvjetno biti ista za model i

prototip, a jednađžba količine gibanja (2.39) će biti ista za dvije pojave ako su koeficijenti u jednađžbama isti kod modela i prototipa. Ti bezdimenzijski koeficijenti (bezdimenzijske značajke) predstavljaju kriterije sličnosti:

- Strouhalov broj

$$\left(\frac{L_R}{u_R t_R} \right)_m = \left(\frac{L_R}{u_R t_R} \right)_p \Rightarrow St = \frac{u \cdot t}{L} = \text{idem},$$

- Froudeov broj

$$\left(\frac{g_R L_R}{u_R^2} \right)_m = \left(\frac{g_R L_R}{u_R^2} \right)_p \Rightarrow \frac{1}{Fr^2} = \text{idem}, \text{ pri čemu je } Fr = \frac{u_R}{\sqrt{g_R L_R}}.$$

Budući da se radi o uzgonskim silama iz ove bi se kombinacije veličina mogao definirati i Grashofov broj, uz pretpostavku da je gustoća funkcija samo temperature. Grashofova značajka se razmatra ukoliko je atmosferski granični sloj termički stratificiran, odnosno kada se javlja efekt uzgona.

- Rossbyev broj

$$\left(\frac{L_R \omega}{u_R} \right)_m = \left(\frac{L_R \omega}{u_R} \right)_p \Rightarrow Ro = \frac{u_R}{L_R \omega} = \text{idem},$$

- Reynoldsov broj

$$\left(\frac{\mu_R}{\rho_0 L_R u_R} \right)_m = \left(\frac{\mu_R}{\rho_0 L_R u_R} \right)_p \Rightarrow Re = \frac{u_R \cdot L_R \cdot \rho_0}{\mu_R} = \text{idem}.$$

Sličnost dvaju strujanja podrazumijeva jednakost svih bezdimenzijskih brojeva i jednakost bezdimenzijskih funkcija \tilde{p} , $\tilde{\mu}$ i \tilde{g} . Budući je fluid u obje pojave zrak s istim svojstvima jednakost \tilde{p} i $\tilde{\mu}$ će biti osigurana ukoliko su tlak i temperatura u objema pojavama jednaki. Svi kriteriji sličnosti nisu jednako važni. Tako je npr. turbulentno strujanje izrazito nestacionarno strujanje kod kojeg postoji lokalno ubrzanje. Međutim, kada se turbulentno strujanje prikaže zbrojem osrednjenog i pulzirajućeg strujanja, za osrednjeno strujanje se obično pretpostavlja da je stacionarno, budući da se makrometeorološke promjene unutar atmosfere odvijaju vrlo polako (red veličine nekoliko sati), tako da se utjecaj Strouhalove značajke može zanemariti.

Prema Truckenbrodt [44] pri adijabatskoj stratifikaciji atmosfere temperatura opada za 1°C s povećanjem visine od 100 m. U skladu s tim se atmosferski

granični sloj može promatrati kao izotermno strujanje, pa se temperaturna stratifikacija zanemaruje. Stoga se pri modeliranju atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu Grashofova značajka ne razmatra.

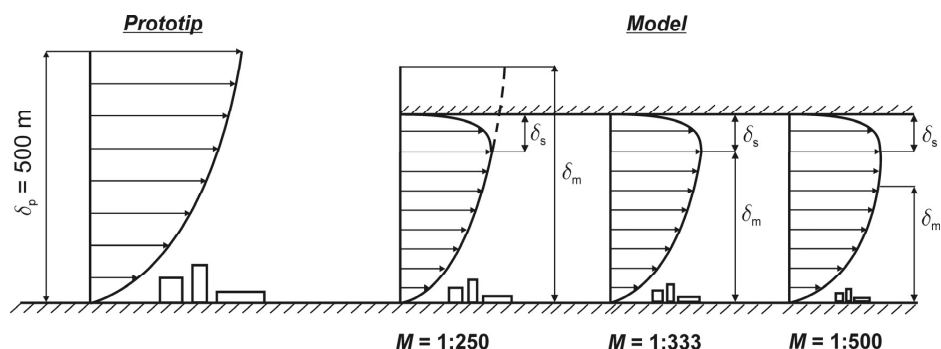
Coriolisova sila se razmatra isključivo u prirodi, i to u gornjem dijelu atmosferskog graničnog sloja, gdje rotacija Zemlje ima utjecaja na profile brzina (Ekmanov sloj). Budući da je u području graničnog sloja brzina \tilde{u}_2 mala, i utjecaj Coriolisove sile će biti mali, pa se može zanemariti. Stoga se Rossbyeva značajka ne razmatra kao kriterij sličnosti.

Kao jedini bitan kriterij sličnosti preostaje Reynoldsova sličnost, koja se nažalost ne može ostvariti, budući da su gustoća i viskoznost u modelu i prototipu istog reda veličine, a mjerilo općenito varira između 1:5000 i 1:50. Postizanje Reynoldsove sličnosti zahtijevalo bi vrijednosti brzine u zračnom tunelu 50 do 5000 puta veće u odnosu na prototip, što bi odgovaralo nadzvučnom strujanju. Time bi kod modela postao značajan utjecaj stlačivosti strujanja, što kod prototipa nije slučaj. Iz navedenog razloga se sličnost Reynoldsove značajke na modelu i prototipu ne može postići.

Sličnost strujanja bit će postizana putem sličnosti parametara strukture strujanja bitnih za promatranu pojavu.

2.3.2. Pregled kriterija sličnosti kod drugih autora

U zračnom tunelu se atmosferski granični sloj ne može u svakom mjerilu modelirati u punom opsegu zbog ograničenih dimenzija mjerne sekcije. U manjim mjerilima se modelira puna debljina graničnog sloja, a u većim mjerilima samo donji dio graničnog sloja. U većim mjerilima se najveći vrtlozi koji se javljaju u prirodi, reda veličine debljine graničnog sloja, u zračnom tunelu ne mogu modelirati, a samim tim i proces raspada velikih vrtloga. Na stropu mjerne sekcije nastaje k tome sekundarni granični sloj, koji deformira gornje slojeve modeliranog atmosferskog graničnog sloja, kao što je prikazano na slici 2.18.



Slika 2.18: Generiranje modela atmosferskog graničnog sloja u različitim mjerilima

Odnos dimenzija najvećih i najmanjih vrtloga je u prirodi znatno veći nego u zračnom tunelu. Pritom su gradijenti brzine u zračnom tunelu znatno veći u odnosu na gradijente brzine u prirodi. Detalji skaliranja atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu u mjerilima 1:500, 1:333 i 1:250 shematski su prikazani u tablici 2.1.

Prototip		Mjerilo	Model		Dimenzije vrtloga preslikane s modela na prototip [m]
$\bar{\delta}_p$ [m]	Dimenzije vrtloga [m]		$\bar{\delta}_m$ [m]	Dimenzije vrtloga [m]	
0 - 500 m	1 mm - 500 m	1:500	0 – 1.0 m	1 mm – 1.0 m	0.50 m - 500 m
		1:333	0 – 1.5 m	1 mm – 1.5 m	0.33 m - 500 m
		1:250	0 – 2.0 m	1 mm – 1.5* m	0.25 m - 375 m

* ograničenje debljine graničnog sloja zbog stropa mjerne sekcije zračnog tunela

Tablica 2.1: Pregled raspona dimenzija vrtloga kod modela atmosferskog graničnog sloja u različitim mjerilima

Očito je da se struktura strujanja unutar atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu ne može u potpunosti modelirati. Međutim, uz ispunjenje određenih uvjeta moguće je generirati model atmosferskog graničnog sloja koji je dovoljno dobar za praktične primjene.

Sličnost profila osrednjenih brzina

Ukoliko je Reynoldsova značajka definirana korištenjem aerodinamičke duljine hrapavosti z_0 , tada je prvi uvjet sličnosti profila osrednjenih brzina kod modela i prototipa, prema WTG [33]

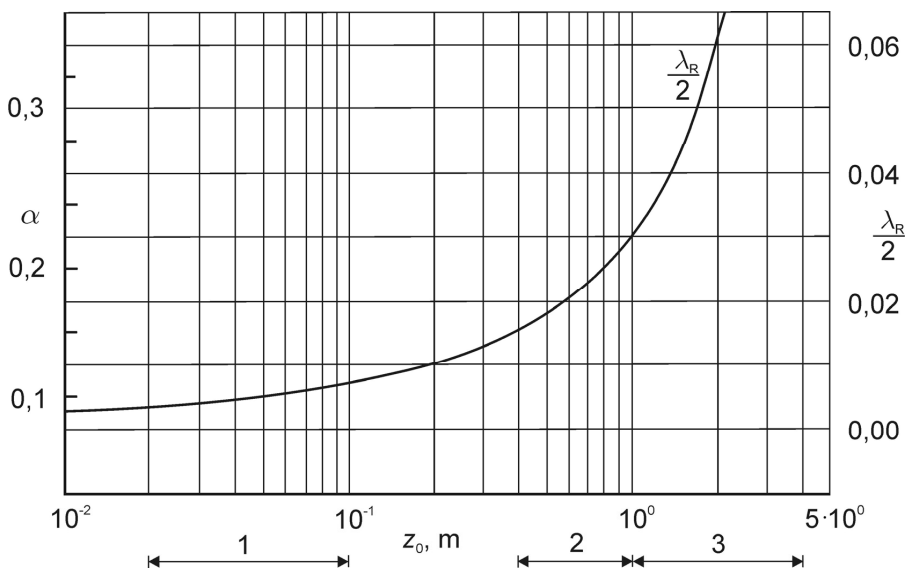
$$Re_R = \frac{u_T \cdot z_0}{\nu} > 5, \quad (2.40)$$

pri čemu je $\nu_{\text{zrak}} = 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ kod 20°C i 10^5 Pa .

Brzina u_T se može, prema Sockel [45], prikazati sljedećim izrazom

$$u_T^2 = \lambda_R \frac{\bar{u}_{3600}^2(10)}{2}. \quad (2.41)$$

Brzina $\bar{u}_{3600}(10)$ predstavlja osrednjenu vrijednost brzine kroz period od jednog sata na efektivnoj visini od 10 m. Vrijednosti $\lambda_R/2$ dobivene eksperimentom, dane su ovisno o podnoj hrapavosti na slici 2.19, prema Pasquill [46] i Duchene-Marullaz [47].



Slika 2.19: Vrijednost koeficijenta trenja $\lambda_R/2$ kao funkcija aerodinamičke duljine hrapavosti z_0 , prema Pasquill [46] i Duchene-Marullaz [47]

Drugi kriterij sličnosti je jednakost Jensenove značajke za model i prototip, prema Cook [48],

$$Je = \frac{z_{0m}}{\delta_m} = \frac{z_{0p}}{\delta_p} . \quad (2.42)$$

Treći kriterij sličnosti predstavlja jednakost eksponenta zakona potencije α u prirodi i u zračnom tunelu, prema WTG [33]

$$\alpha_m = \alpha_p . \quad (2.43)$$

Sličnost strukture turbulencije

Rezultati dosadašnjih istraživanja su, prema Sundaram i dr. [23], pokazali da je moguće postići sličnost strukture turbulencije na modelu i prototipu. Prema Cook [48] se turbulentna struktura iz prirode može dovoljno točno modelirati u zračnom tunelu ukoliko Jensenova značajka kod modela i prototipa ima istu vrijednost. Plate [42] je razvio dvije metode postizanja sličnosti turbulentnog strujanja u zračnom tunelu prikazane u tablici 2.2, koje su sastavljene od nekoliko različitih kriterija.

	Metoda 1		obje metode	Metoda 2	
Konfiguracija	δ/h	z_{0m}/z_{0p}	u_m/u_{tp}	α_m/α_p	$f_{Mm}\bar{u}_{\delta m}/f_{Mp}\bar{u}_{\delta p}$
$h \ll \delta$	-	λ	$\frac{u_r \cdot z_0}{v} > 5$	1	λ
$h \approx \delta$	λ	λ		1	λ

Tablica 2.2: Kriteriji sličnosti pri modeliranju atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu, prema Plate [42]

U zračnom tunelu nije moguće potpuno modelirati spektar kinetičke energije turbulencije, budući da je raspon karakterističnih vremena pojava u prirodi vrlo velik (od nekoliko sekundi do više mjeseci). Stoga se spektri kinetičke energije turbulencije proučavaju isključivo u mikrometeorološkom području.

Pri modeliranju spektra kinetičke energije turbulencije je cilj postizanje sličnosti profila spektra u prirodi i u zračnom tunelu. Ovaj uvjet ne može biti u potpunosti ispunjen, budući da postoje razlike u načinu produkcije i disipacije energije. K

tome su gradijenti brzine u smjeru glavnog strujanja u zračnom tunelu bitno veći u odnosu na prirodu.

U većini slučajeva dovoljan uvjet za postizanje sličnosti je ispravno modeliranje srednjeg dijela spektra, tj. područja raspada velikih vrtloga na manje u kojem vrijedi zakon Kolmogorova $-2/3$ ili $-5/3$.

2.3.3. Odabrani kriteriji sličnosti

Za potpuno točno modeliranje atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu bilo bi potrebno postići sličnost bezdimenzijske Re značajke na modelu i prototipu. To nažalost, kako je već prije objašnjeno, nije moguće. Stoga se kod modela provodi usporedba vrijednosti bitnih parametara koji karakteriziraju strukturu strujanja u prirodi (profil osrednjene vrijednosti brzine u smjeru glavnog strujanja \bar{u} i korelacije $\overline{u'u'}$, $\overline{v'v'}$, $\overline{w'w'}$ i $\overline{u'w'}$). Na osnovu razmatranja rezultata dosadašnjih istraživanja odabrani su sljedeći kriteriji za postizanje sličnosti strujanja između modela i prototipa:

- $\frac{u_r \cdot z_0}{\nu} > 5,$
- $\alpha_m / \alpha_p = 1,$
- $z_{0m} / z_{0p} = \lambda,$
- $\delta_m / \delta_p = \lambda.$

Također gubitak statičkog tlaka duž mjerne sekcije zračnog tunela, koji se javlja uslijed trenja struje zraka sa stijenkama mjerne sekcije zračnog tunela, mora biti unutar propisanih granica. Dopušteno odstupanje statičkog tlaka u praznoj mjernoj sekciji zračnog tunela, prema WTG [33], iznosi

$$\frac{\frac{\partial p}{\partial x} \cdot \delta}{\frac{\rho}{2} \cdot \bar{u}_\delta^2} \leq 0.05. \quad (2.44)$$

Pri modelskim ispitivanjima nužno je izbjeći utjecaj stijenki mjerne sekcije na modeliranu strukturu strujanja. Pri opisu tog utjecaja se koristi tzv. stupanj začepjenosti mjerne sekcije, koji se definira kao omjer projekcije nastrujavane

površine modela A_M i poprečnog presjeka mjerne sekcije zračnog tunela A_K . Ukoliko je navedeni omjer veći od 5% dolazi do deformiranja strukture generiranog graničnog sloja. U skladu s navedenim, a prema Wolf-Heinrich [49], nužno je ispunjenje sljedećeg uvjeta

$$\frac{A_M}{A_K} \leq 0.05. \quad (2.45)$$

Odabirom navedenih kriterija osigurana je vrlo dobra sličnost fizikalnih procesa u prirodi i u zračnom tunelu.

3. Plan istraživanja

Rezultati dosadašnjih istraživanja pokazuju da se uz primjenu Counihanove metode rezultati dobiveni mjerenjem u zračnom tunelu najbolje podudaraju s rezultatima mjerenja u prirodi. Stoga se u ovom radu za modeliranje atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu koristi Counihanova metoda, uz primjenu barijere, generatora vrtloga i podne hrapavosti. Modeliraju se granični slojevi koji predstavljaju granične slučajeve strukture strujanja u prirodi ($\alpha = 0.17$ i 0.35). Dodatno se modelira i granični sloj $\alpha = 0.21$, čime se olakšava donošenje zaključaka na temelju rezultata mjerenja. Odabrani granični slojevi su karakterizirani eksponentom zakona potencije α , a prema ESDU [32] nastaju strujanjem zraka iznad:

- polja s rijetko raspoređenim i niskim raslinjem ($\alpha=0.17$),
- predgrađa s niskim obiteljskim kućama i niskim stablima ($\alpha=0.21$),
- centra grada s visokim i gusto raspoređenim zgradama ($\alpha=0.35$).

Ovakvim izborom graničnih slojeva obuhvaćene su gotovo sve strukture strujanja u prirodi. Navedeni tipovi atmosferskog graničnog sloja modeliraju se u tri različita mjerila, s ciljem istraživanja utjecaja mjerila na strukturu modela atmosferskog graničnog sloja. Vrijednost mjerila se određuje iz odnosa modelske i prototipne debljine atmosferskog graničnog sloja, uz $\delta_p = 500$ m. U kasnijoj fazi istraživanja se planiraju provesti modelska ispitivanja s ciljem određivanja stacionarnih i nestacionarnih opterećenja uslijed strujanja zraka na modelu kocke, pa se u ovoj fazi istraživanja odabiru ona mjerila, koja će biti pogodna za kasnija modelska ispitivanja. Pri izboru mjerila postoje određena ograničenja. Budući da pri modelskim ispitivanjima stupanj začepljenosti mjerne sekcije ne smije biti veći od 5%, odabire se kao najveće mjerilo 1:250 (pojam najvećeg mjerila se uvijek odnosi na mjerilo u kojem je debljina modela atmosferskog graničnog sloja najveća). Odabir većeg mjerila rezultirao bi nedopušteno velikim iznosom stupnja začepljenosti mjerne sekcije. Također visina modela u odnosu na visinu pojedinih elemenata podne hrapavosti ne smije biti premala, budući da u tom slučaju pojedini elementi podne hrapavosti mogu imati značajan utjecaj na strukturu strujanja u donjem dijelu graničnog

sloja. Stoga se kao najmanje mjerilo odabire 1:500. Da bi se diskusija o strukturi modeliranog atmosferskog graničnog sloja mogla izvesti na većem broju rezultata mjerenja, čime se povećava vjerodostojnost izvedenih spoznaja, odabire se kao treće mjerilo 1:333, koje se nalazi između dva granična mjerila (1:250 i 1:500).

Budući da se kod primjene Counihanove metode ne mogu unaprijed odrediti potrebni parametri (visina i oblik ispuščenja barijere, dimenzije generatora vrtloga, te visina i gustoća podne hrapavosti) koji osiguravaju unaprijed zadani model atmosferskog graničnog sloja, generirat će se veći broj modela. Pritom se koriste rezultati dosadašnjih istraživanja o utjecaju promjene visine barijere, visine ispuščenja na barijeri, te visine i gustoće raspodjele elemenata podne hrapavosti na strukturu modeliranog atmosferskog graničnog sloja, prema Kozmar [6].

Struktura generiranih graničnih slojeva bit će detaljnije analizirana samo kada budu zadovoljeni postavljeni kriteriji, odnosno kada se postigne podudarnost vrijednosti svih relevantnih parametara s rezultatima mjerenja u prirodi prema ESDU. U navedenim slučajevima (za tri različita α u tri različita mjerila) usporedit će se struktura istovjetnih graničnih slojeva (zadani α) u sva tri mjerila. Analizirat će se razlike u vrijednostima svih relevantnih parametara. Također će se ispitati promjene strukture strujanja u promatranom mjerilu za različite modele atmosferskog graničnog sloja (analiza promjena relevantnih parametara strujanja s promjenom α).

Za sve konfiguracije modeliranog atmosferskog graničnog sloja određuju se u svakom mjernom mjestu vrijednosti sljedećih parametara:

- osrednjene vrijednosti brzine strujanja u x, y i z smjeru,
- intenzitet turbulencije u x, y i z smjeru,
- tangencijalne komponente Reynoldsovih naprezanja,
- integralne duljinske mjere turbulencije u x, y i z smjeru.

U konfiguracijama u kojima struktura modeliranog graničnog sloja odgovara zadanim postavkama ($\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35 u mjerilima 1:500, 1:333 i 1:250) se dodatno određuje i frekvencijska raspodjela kinetičke energije turbulentnih pulzacija u x smjeru.

Vrijednosti svih navedenih parametara određuju se na odabranom broju mjernih mjesta na različitim visinama unutar graničnog sloja. U donjem dijelu graničnog sloja su mjerna mjesta u odnosu na gornji dio gušće raspoređena, što omogućava preciznije definiranje strukture modeliranog graničnog sloja. To je vrlo važno s aspekta usporedbe mjernih rezultata s rezultatima u prirodi s obzirom da u donjem dijelu graničnog sloja uz zakon potencije vrijedi i logaritamski zakon. Raspodjela mjernih mjesta po visini je provedena u skladu sa sljedećim izrazom:

$$z_{n+1} = z_n \cdot a = z_1 \cdot a^n. \quad (3.1)$$

Uz zadanu visinu najnižeg mjernog mjesta z_1 , debljinu simuliranog graničnog sloja $z_N = \delta$ i broj mjernih mjesta N , koeficijent a se definira izrazom

$$a = \left(\frac{z_N}{z_1} \right)^{\frac{1}{N-1}}. \quad (3.2)$$

Visine mjernih mjesta prikazane su u tablici 3.1.

	$M = 1:500$	$M = 1:333$	$M = 1:250$
Mjerno mjesto	z , mm	z , mm	z , mm
1	50	75	100
2	60	90	120
3	71	107	142
4	85	128	170
5	101	152	202
6	121	182	242
7	144	216	288
8	172	258	344
9	205	308	410
10	244	366	488
11	291	437	582
12	347	521	694
13	414	621	828
14	494	741	988
15	589	884	1178
16	703	1055	1406
17	838	1257	-
18	1000	1500	-

Tablica 3.1: Raspodjela mjernih mjesta po visini

Uz navedeni način raspodjele mjernih mjesta se u području valjanosti logaritamskog zakona nalazi veći broj mjernih točaka. U mjerilu 1:250 nije moguće u mjernoj sekciji zračnog tunela modelirati cjelokupnu debljinu atmosferskog graničnog sloja. U navedenom mjerilu debljina graničnog sloja iznosi 2 m, a visina mjerne sekcije iznosi 1.8 m, pa se generira približno 70% debljine graničnog sloja. Također se za svaku konfiguraciju provode mjerenja statičkog tlaka na nagibnom stropu mjerne sekcije zračnog tunela s ciljem postizanja minimalnog odstupanja statičkog tlaka na konstantnoj visini duž mjerne sekcije zračnog tunela.

4. Eksperimentalna istraživanja u zračnom tunelu

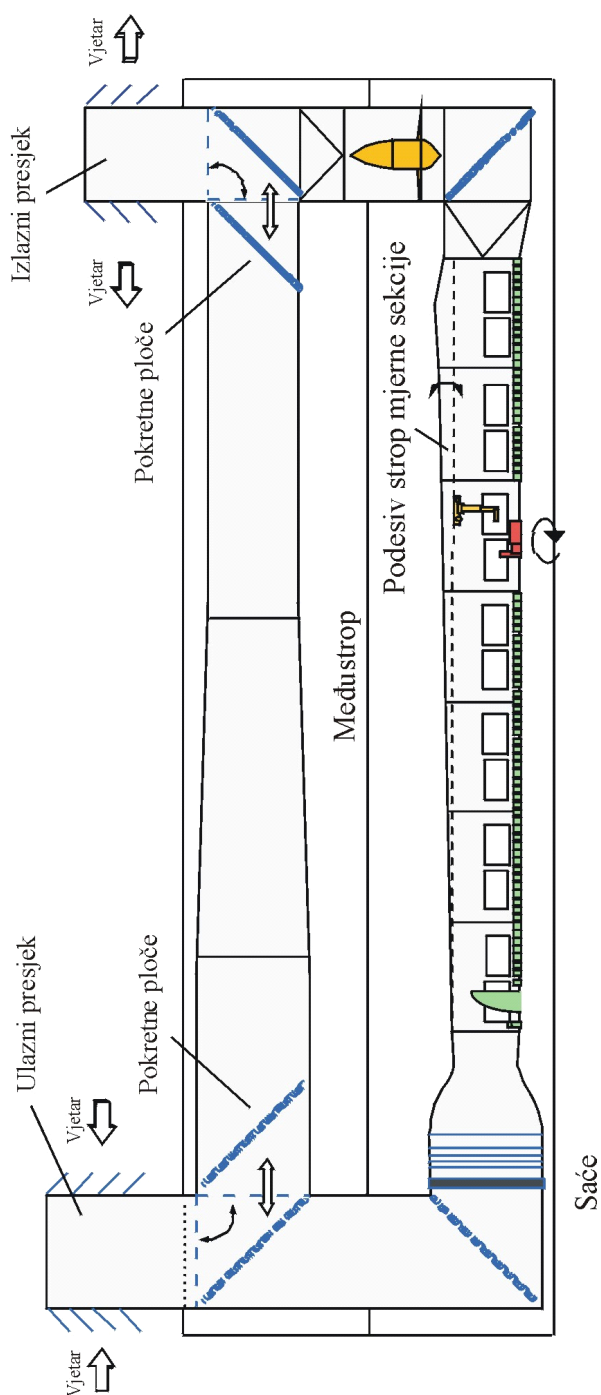
4.1. Zračni tunel

Eksperimentalna istraživanja provedena su u zračnom tunelu C na Katedri za Mehaniku fluida Tehničkog Sveučilišta u Münchenu, shematski prikazanom na slici 4.1. Zračni tunel je tipa Göttingen i namijenjen je generiranju graničnog sloja. U njemu je moguće provoditi sljedeća mjerenja:

- Mjerenje sile i momenta (6 komponenti),
- Stacionarna i nestacionarna mjerenja tlaka,
- Mjerenje brzine (višeanalna anemometrija),
- Particle-Image-Velocimetrie (PIV),
- Laser-Doppler anemometrija,
- Mjerenje koncentracije,
- Vizualizacija strujanja (laser, tekući kristali, dim).

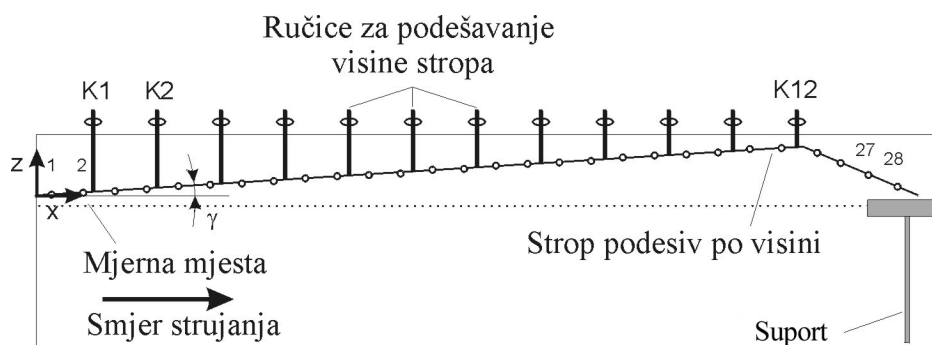
Eksperimente je moguće provoditi uz zatvoreni i otvoreni sustav rada zračnog tunela. Mjerenja brzine, tlaka i sile se vrše pri zatvorenoj, a mjerenja koncentracije pri otvorenoj mjernoj sekciji. Promjena iz zatvorenog u otvoreni sustav rada se vrši uz pomoć pokretnih ploča. Ulazni i izlazni otvor prema atmosferi se nalaze udaljeni jedan od drugoga, čime se izbjegava ponovno usisavanje ispuhanog zraka. Ispod otvora je ugrađen prigušivač zvuka, koji buku tijekom izvođenja eksperimenta prigušuje na 60 dB. Protuprašni filter u ulaznom dijelu svodi količinu onečišćenja mjerne sekcije zračnog tunela na najmanju moguću mjeru.

Ispitivanja opisana u ovom radu su izvršena pri zatvorenom sustavu rada zračnog tunela. Zrak struji kroz ulazni dio zračnog tunela, kutni element, te nakon prostrujavanja kroz saće i četiri sita nailazi na mjernu sekciju zračnog tunela, nakon koje nailazi na kutni element i biva ponovo usmjeren prema ulaznom poprečnom presjeku zračnog tunela. Saće i sita omogućavaju ravnomjeran profil osrednjenih brzina i intenziteta turbulencije u x smjeru.



Slika 4.1: Zračni tunel C Katedre za Mehaniku fluida Fakulteta strojarstva Tehničkog Sveučilišta u Münchenu

Sapnica tipa Börger stupnja kontrakcije 2.12:1 pridonosi poboljšanju stabilnosti strujanja, tako da intenzitet turbulencije u x smjeru na početku mjerne sekcije zračnog tunela iznosi manje od 1%. Mjerna sekcija zračnog tunela duljine 19.4 m je zatvorenog tipa. Poprečni presjek mjerne sekcije predstavlja četverokut visine 1.8 m i širine 2.7 m, što omogućava simuliranje graničnih slojeva do približno 1.8 m debljine. Tijekom izvođenja eksperimenata se procesi u mjernoj sekciji zračnog tunela mogu promatrati kroz velike prozore od plexiglasa, koji se nalaze na prednjoj strani zračnog tunela i omogućavaju pristup izvana do svakog pojedinog dijela mjerne sekcije. Strop mjerne sekcije zračnog tunela je podesiv po visini (60 cm visine na 2.4 m duljine), što omogućava kompenzaciju smanjenja statičkog tlaka koji nastaje duž mjerne sekcije uslijed trenja, prikazano na slici 4.2.



Slika 4.2: Po visini podesiv strop mjerne sekcije zračnog tunela

U podu mjerne sekcije, na poziciji 11.3 m nizvodno od sapnice, se nalazi središte rotirajuće kružne ploče. Rotirajuća kružna ploča služi kao nosač modela građevinskih objekata i omogućava simulaciju nastrujavanja iz različitih smjerova. Na kraju mjerne sekcije zračnog tunela se nalazi gusta metalna mreža, koja onemogućava da pojedini eventualno otkinuti dijelovi modela ili elementi podne hrapavosti oštete propeler ventilatora. Ona također služi i za smirivanje struje zraka, koja je na kraju mjerne sekcije vrlo turbulentna. Poseban element omogućava prijelaz s četvrtastog na kružni profil u kojem se nalazi aksijalni ventilator instalirane snage 180 kW. Maksimalna brzina strujanja

zraka u zračnom tunelu iznosi 30 m/s. Brzinu strujanja zraka u mjernoj sekciji zračnog tunela moguće je regulirati, pri čemu je moguća regulacija broja okretaja ventilatora i regulacija nagiba zakretnih lopatica u kutnom elementu. Regulacija brzine strujanja vrši se na taj način da se mjeri brzina struje zraka na ulazu u mjernu sekciju i uz pomoć dobivenih rezultata se regulira broj okretaja ventilatora. Promjenom nagiba zakretnih lopatica, koje se nalaze u kutnom elementu, mijenja se odnos broja okretaja ventilatora i brzine struje zraka na ulazu u mjernu sekciju zračnog tunela. Eksperimenti u okviru ovog rada su provedeni pri kutu nagiba zakretnih lopatica 11.5° , pri kojem je izveden sljedeći izraz za ovisnost osrednjene vrijednosti brzine u uzdužnom smjeru u slobodnoj struji i brzine vrtnje ventilatora:

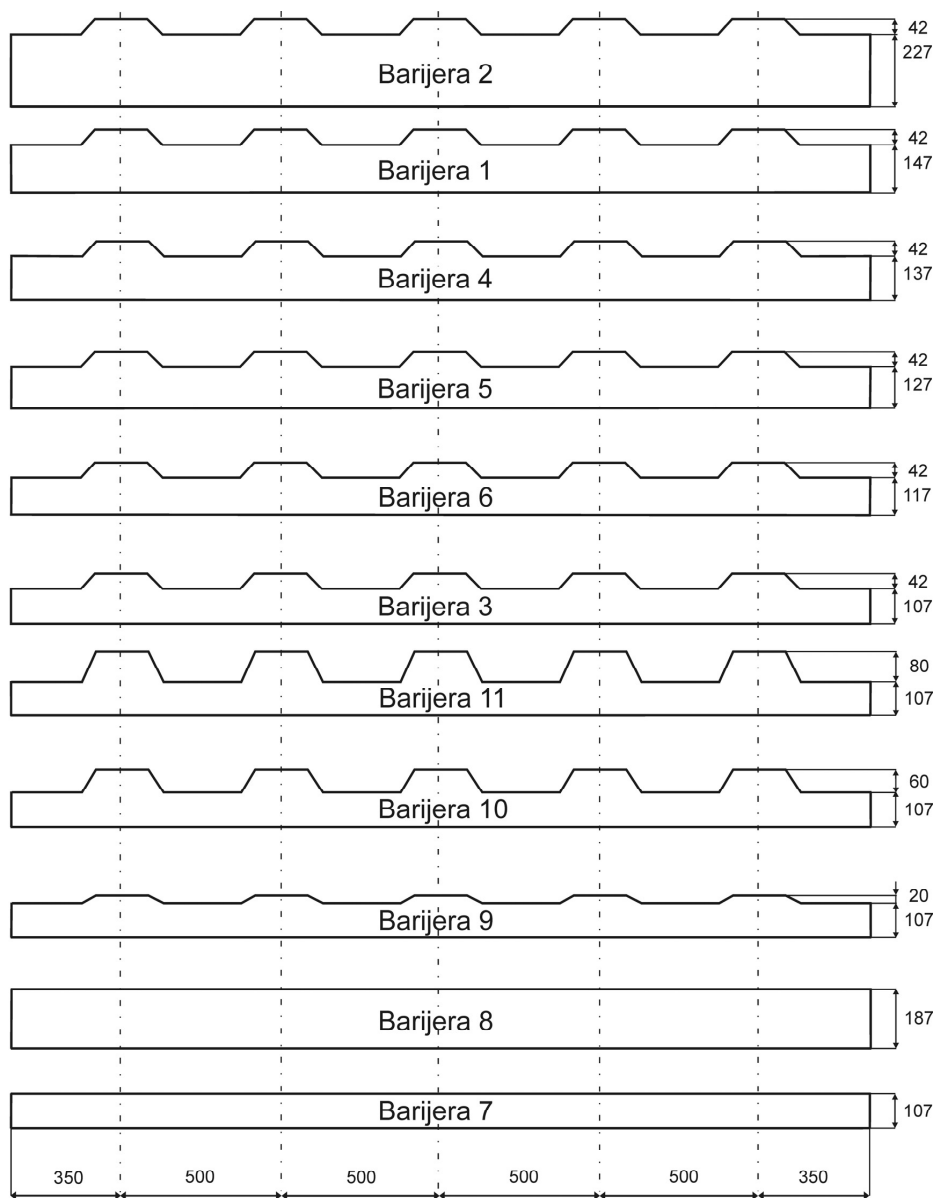
$$\{\bar{u}\}_{\text{m/s}} = 0.0367 \cdot \{n\}_{\text{o/min}} - 1.1459. \quad (4.1)$$

Brzina struje zraka se može kontinuirano regulirati od minimalne (1 m/s) do maksimalne vrijednosti (30 m/s). Fiksne lopatice koje su smještene prije i poslije ventilatora smanjuju nivo intenziteta turbulencije, odnosno gubitke u kutnom elementu. Kratki difuzor predstavlja prijelaz na kvadratni poprečni presjek izlaza zračnog tunela. Poseban suport omogućava mjerenje raznim mjernim uređajima na svakoj pojedinoj poziciji unutar mjerne sekcije, pri čemu ne dolazi do deformacije strukture strujanja.

4.2. Generiranje graničnog sloja Counihanovom metodom

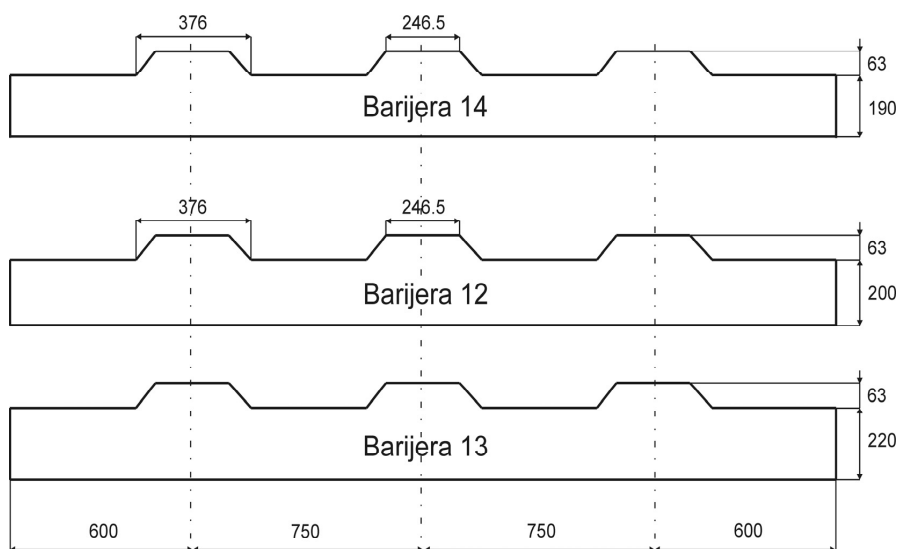
4.2.1. Barijera

Barijera se koristi za generiranje vrtloga s horizontalnom osi vrtnje i redukciju osrednjenih vrijednosti brzine u donjem dijelu modeliranog graničnog sloja. Postavlja se na početku mjerne sekcije između bočnih stijenki. Na gornjem rubu barijere nalaze se ispupčenja. Gornja površina barijere s ispupčenjima je ravna. Visina barijere i visina ispupčenja se mogu varirati u koracima od 5 mm. Tijekom izvođenja eksperimenata korišteno je 15 različitih barijera, koje su prikazane na slici 4.3, slici 4.4 i slici 4.5. Numeriranje barijera odgovara

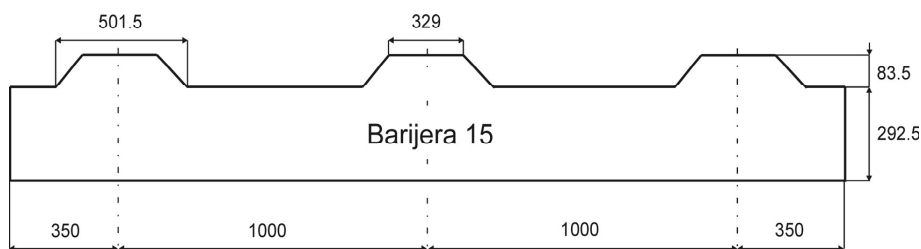


Slika 4.3: Barijere u mjerilu 1:500

vremenskom slijedu izvođenja eksperimenata. Barijera označena brojem 1 je izrađena skaliranjem barijere koju je Counihan koristio u svojim eksperimentima. Ostale barijere predstavljaju različite varijacije Counihanove barijere.



Slika 4.4: Barijere u mjerilu 1:333

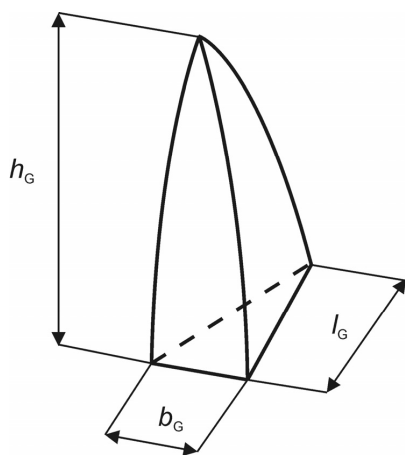


Slika 4.5: Barijera u mjerilu 1:250

4.2.2. Generatori vrtloga

Strujanjem zraka oko generatora vrtloga nastaju vrtlozi s vertikalnom osi vrtnje. Nizvodno od generatora vrtloga nastaje granični sloj, čija visina odgovara visini generatora vrtloga. Pri Counihanovim istraživanjima s trokutastim generatorima vrtloga (trokutasti oblik gledano u bokocrtu u odnosu na smjer glavnog strujanja), prema Counihan [4], dolazi do prevelikog gubitka količine gibanja u donjem dijelu i nedovoljnog gubitku količine gibanja u gornjem dijelu graničnog sloja. Pokazalo se da je uz primjenu eliptičnih generatora (eliptični oblik gledano u bokocrtu) moguće bitno točnije modelirati strukturu strujanja u donjem dijelu graničnog sloja. Stoga su u okviru ovog rada primijenjeni eliptični generatori

virtloga. Bokocrt generatora virtloga predstavlja četvrtina površine elipse, čija je velika poluos dvostruko veća od male poluosi. Kut prednjeg (nastrujanog) brida u horizontalnim presjecima ostaje konstantan neovisno o promjeni visine i usmjeren je u smjeru suprotnom od struje zraka. Bočne plohe su simetrične u odnosu na struju zraka, pa su stoga karakteristike strujanja na objema stranama identične. Kut prednjeg (nastrujanog) brida bi prema Counihanu [4] trebao iznositi $5^{\circ} \div 6^{\circ}$. Pri istraživanjima u okviru ovog rada su korišteni generatori virtloga s prednjim kutem 6° , koji je konstantan po cijeloj visini generatora virtloga. Polazna pretpostavka istraživanja u okviru ovog rada je da je debljina graničnog sloja u atmosferi 500 m. Generatori virtloga u mjerilima 1:500 i 1:333 su izrađeni u potpunosti prema prijedlogu Counihana, prema [2], [3], [4], prikazano na slici 4.6.

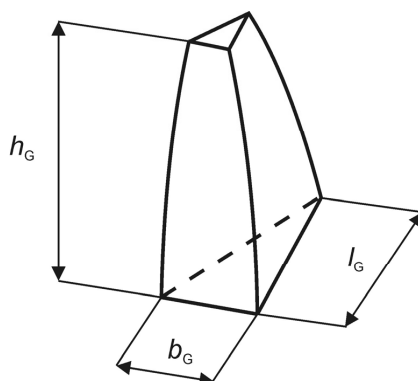


Mjerilo	b_G , mm	h_G , mm	l_G , mm
1:500	105	1000	500
1:333	158	1500	750

Slika 4.6: Generator virtloga u mjerilima 1:500 i 1:333

U mjerilu 1:250 nije moguće izraditi generatore virtloga prema Counihanovom prijedlogu zbog nedovoljne visine mjerne sekcije zračnog tunela (1.8 m). Generatori virtloga bi bili visoki 2 m i ne bi ih bilo moguće smjestiti u mjernu sekciju. Stoga su u mjerilu 1:250 generatori virtloga izrađeni prema vlastitom

konceptu. Širina i duljina generatora vrtloga proračunata je na punu visinu Counihanovog generatora vrtloga (2 m). Nakon toga je generator vrtloga na visini 1.7 m odrezan, čime je omogućeno fizičko smještanje u mjernoj sekciji. Na ovaj način je moguće generiranje približno 75% pune debljine graničnog sloja δ , a struktura strujanja odgovara slici strujanja u prirodi. Generator vrtloga u mjerilu 1:250 je prikazan na slici 4.7.

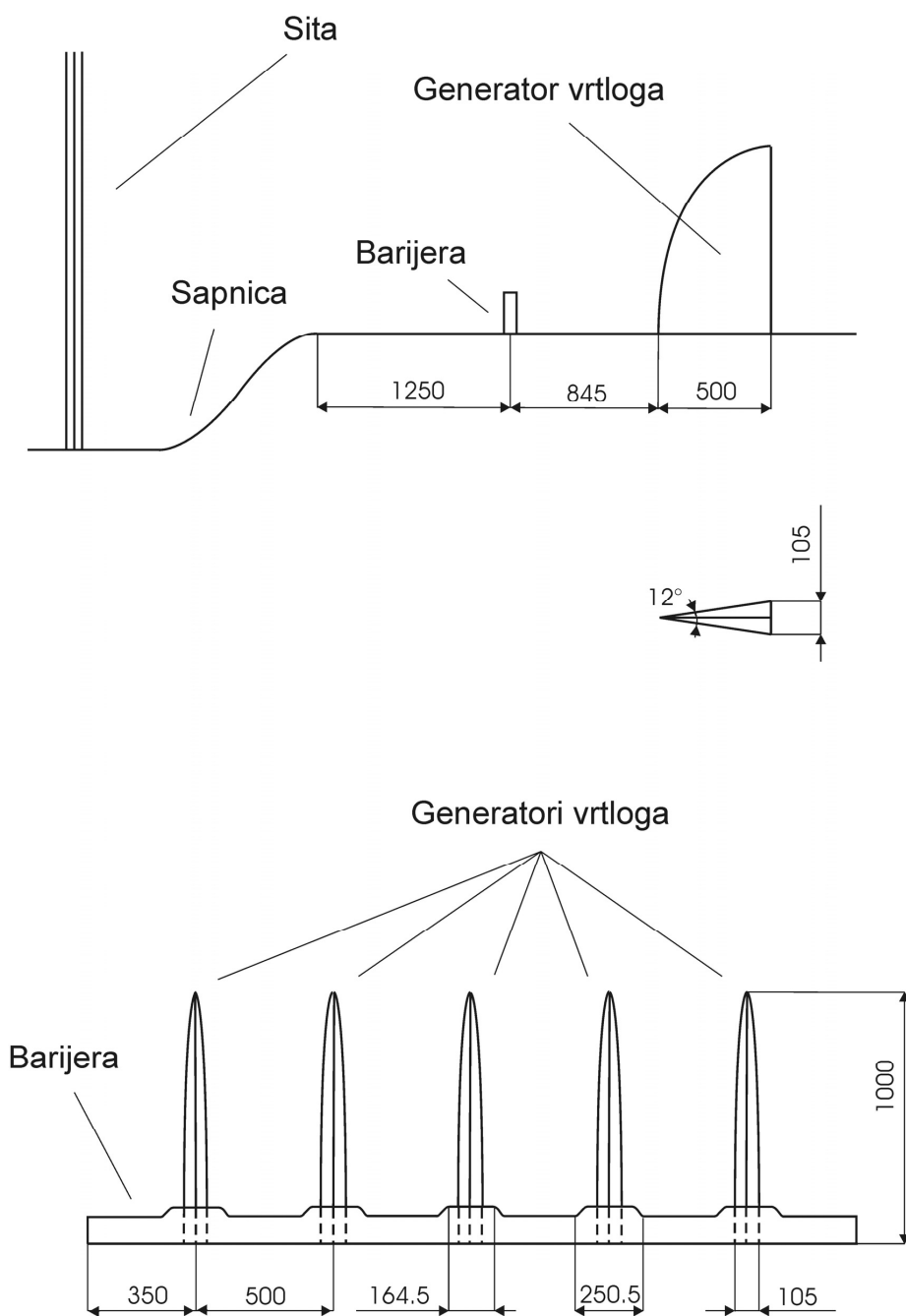


Mjerilo	b_G , mm	h_G , mm	l_G , mm
1:250	210	1700	1000

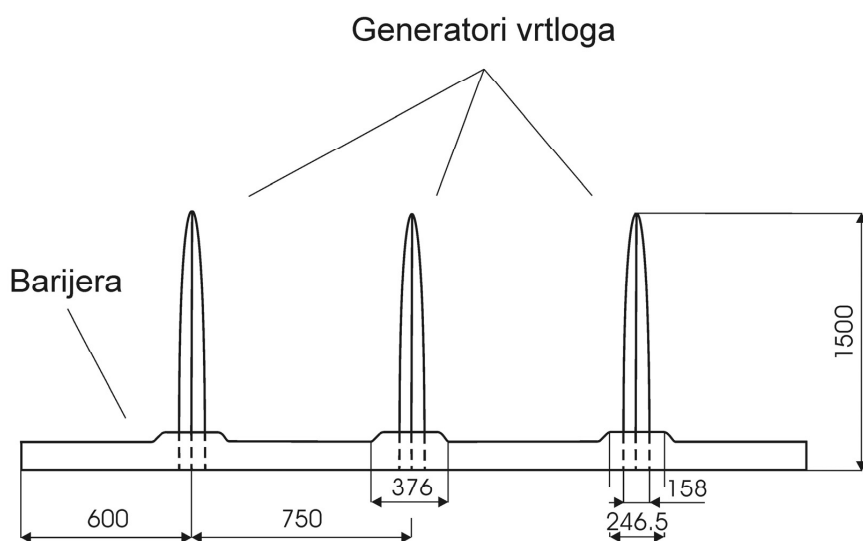
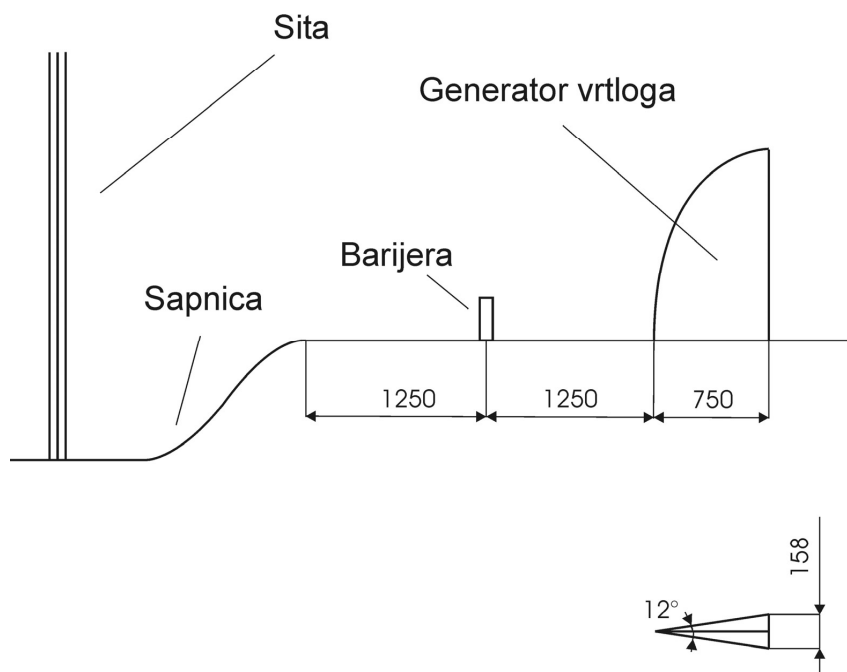
Slika 4.7: Generator vrtloga u mjerilu 1:250

Međusobni razmak generatora vrtloga pri vlastitim istraživanjima iznosi 0.5δ (50% debljine graničnog sloja), budući da se prema Counihanu [3], [4] pokazalo, da se struktura atmosferskog graničnog sloja najtočnije modelira kada je razmak među generatorima $(0.5 \div 0.6)\delta$.

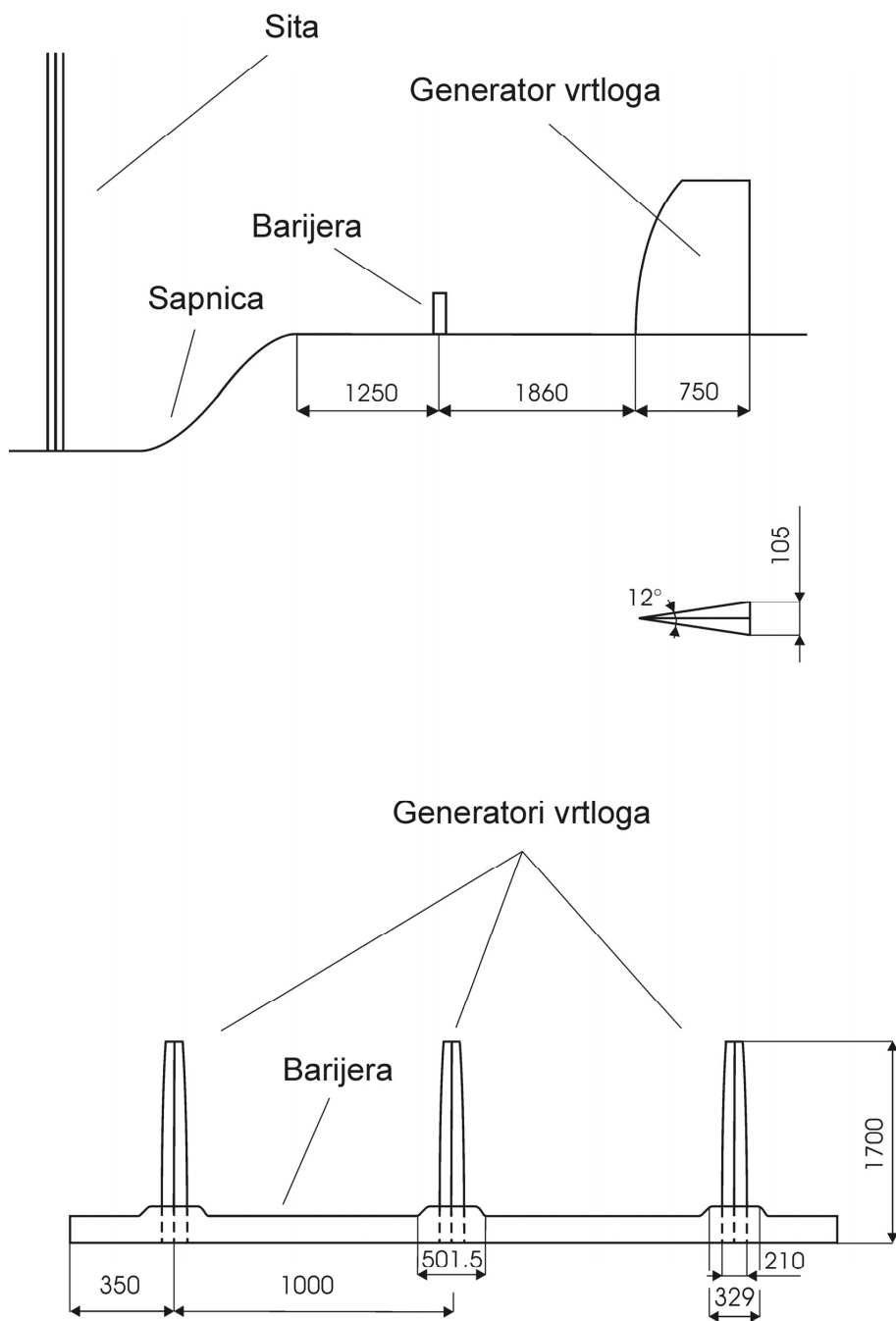
Razmak između barijere i uzvodnog ruba generatora vrtloga iznosi pri Counihanovim eksperimentima približno 83% debljine graničnog sloja δ , prema Counihan [3]. U okviru ovog rada ta udaljenost iznosi 83% - 93% debljine graničnog sloja δ . Primijećeno je da sa smanjenjem razmaka između barijere i generatora vrtloga opada intenzitet turbulencije na istom mjernom mjestu unutar graničnog sloja. Raspored barijere i generatora vrtloga u mjernoj sekciji zračnog tunela pri vlastitim eksperimentima dan je na slikama 4.8, 4.9 i 4.10.



Slika 4.8: Raspored barijere i generatora vrtloga u mjernoj sekciji zračnog tunela u mjerilu 1:500



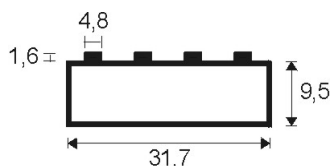
Slika 4.9: Raspored barijere i generatora vrtloga u mjernoj sekciji zračnog tunela u mjerilu 1:333



Slika 4.10: Raspored barijere i generatora vrtloga u mjernoj sekciji zračnog tunela u mjerilu 1:250

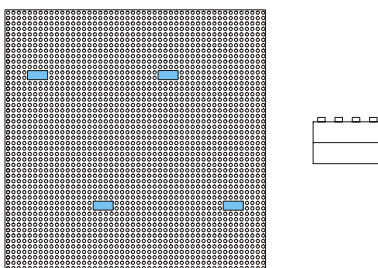
4.2.3. Podna hrapavost

Podna hrapavost služi za generiranje i održavanje odgovarajuće strukture turbulencije u donjem dijelu modeliranog graničnog sloja. Pod mjerne sekcije, nizvodno u odnosu na generatore vrtloga treba, prema Counihan [4], biti obložen podnom hrapavosti u minimalnoj duljini $(3\div 4)\delta$ iza stražnje plohe generatora vrtloga da bi modelirani granični sloj postigao stanje ravnoteže. Pod mjerne sekcije zračnog tunela je oblijepljen LEGO pločama dimenzija 380 x 380 mm, na koje su pričvršćene LEGO kocke, čije su dimenzije prikazane na slici 4.11.



Slika 4.11: Dimenzije LEGO kocke

Na svakoj LEGO ploči je pravilno raspodijeljeno 2304 malenih ispupčenja (48 x 48 čvorova). LEGO ploče su postavljene na podu mjerne sekcije u ukupnoj duljini 14 m (11 m između generatora vrtloga i sredine okretne ploče, i 3 m nizvodno od sredine okretne ploče). Različiti tipovi podne hrapavosti izvedeni su variranjem gustoće obloženosti poda mjerne sekcije LEGO kockama i visine LEGO kocaka. Korišteno je 19 različitih tipova podne hrapavosti označenih s R1 do R19. Prikazane su u prilogu B, a na slici 4.12 je kao primjer prikazana struktura podne hrapavosti R4.



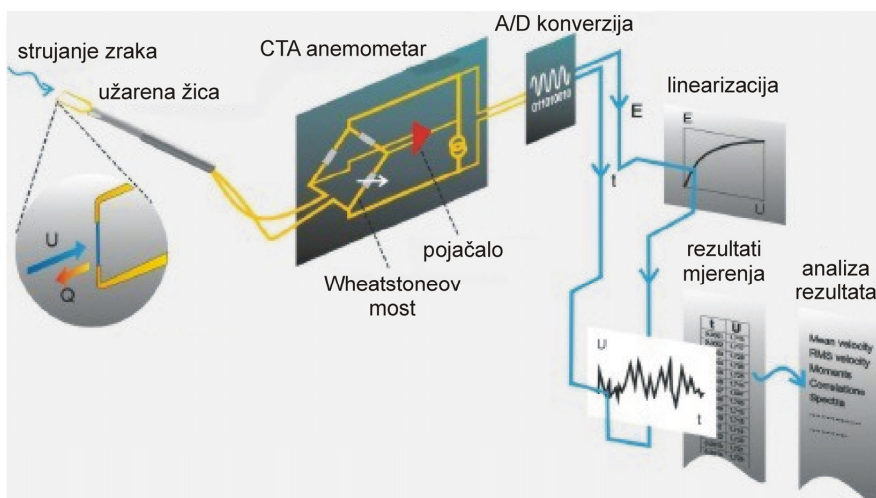
Slika 4.12: Struktura podne hrapavosti R4

4.3. Opis mjerne opreme i specifikacija mjernih parametara

U okviru ovog rada su provedena mjerenja brzine s ciljem određivanja strukture modela atmosferskog graničnog sloja i mjerenja statičkog tlaka na stropu mjerne sekcije zračnog tunela s ciljem određivanja kuta nagiba stropa mjerne sekcije, pri kojem se javljaju minimalna odstupanja statičkog tlaka na konstantnoj visini duž mjerne sekcije za svaku pojedinu konfiguraciju.

4.3.1. Mjerenje brzine

Mjerenja brzine su provedena metodom užarene žice uz pomoć anemometra konstantne temperature (CTA). Anemometrom se mjeri brzina u točki u tri smjera, a rezultat je niz podataka koji se statistički obrađuje u vremenskoj i frekvencijskoj domeni. Prikaz komponenti sustava za mjerenje brzine anemometrom konstantne temperature dan je na slici 4.13.



Slika 4.13: Komponente sustava za mjerenje brzine anemometrom konstantne temperature (CTA)

Karakteristike sustava mjerenja brzine anemometrom konstantne temperature (CTA) su:

- mjerno područje od nekoliko cm/s do nadzvučnih brzina,
- visoka razlučivost podataka mjerenja u vremenskoj domeni (pulzacije do nekoliko stotina kHz),
- visoka razlučivost podataka mjerenja u prostornoj domeni (vrtlozi promjera 1 mm, pa čak i manje),
- istovremeno mjerenje sve tri komponente brzine.

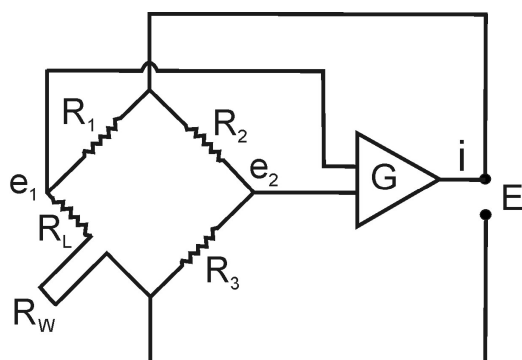
Toplina se s užarene žice odvodi konvekcijom, pri čemu je količina izmijenjenog toplinskog toka \dot{Q} između užarene žice i struje zraka funkcija brzine u , razlike temperatura $T_w - T_0$ i fizikalnih svojstava fluida. Ovisnost količine izmijenjenog toplinskog toka \dot{Q} između užarene žice i struje zraka o brzini strujanja fluida u za slučaj kada je užarena žica smještena okomito na strujanje fluida dana je Kingovim zakonom,

$$\dot{Q} = A + B \cdot u^n \quad \text{uz} \quad n \approx 0.5, \quad (4.2)$$

pri čemu su A i B označene konstante kalibracije, čije vrijednosti ovise o fizikalnim svojstvima fluida i užarene žice, i o radnoj temperaturi.

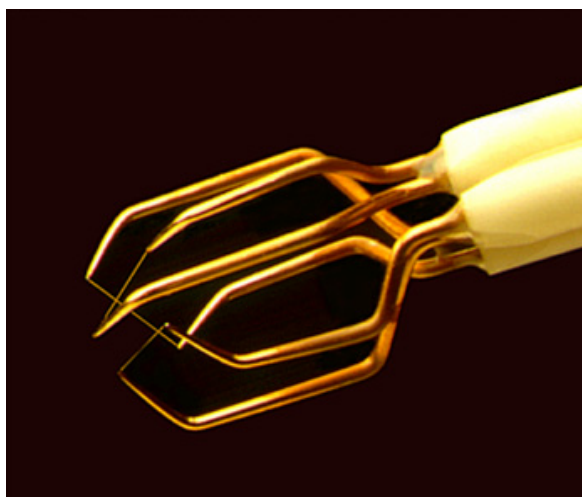
Užarena žica s otporom R_w je spojena na jedan krak Wheatstoneovog mosta i grijana električnom strujom. Servo pojačalo održava most u ravnoteži kontrolom struje na osjetnika, tako da se strujni otpor i temperatura užarene žice održavaju konstantnim, neovisno o hlađenju uslijed strujanja fluida. Napon mosta E predstavlja mjeru za izmijenjenu količinu toplinskog toka \dot{Q} . Vrlo mala termalna inertnost osjetnika i visoki faktor pojačanja servo pojačala omogućavaju vrlo brzi odgovor sustava na pulzacije strujanja fluida. Shema spajanja užarene žice dana je na slici 4.14.

Mjerenja brzine u okviru ovog rada se provode trostrukom užarenom žicom Dantec 55P91 izrađenom od platine i volframa. Užarena žica je duga 1.25 mm uz promjer 5 μm . Strujni otpor osjetnika iznosi 3.5 Ω pri temperaturi 20°C. Maksimalna temperatura zagrijavanja osjetnika iznosi 300°C, a maksimalna temperatura okoliša 150°C. Minimalna brzina strujanja fluida pri kojoj je moguće



Slika 4.14: Shema spajanja užarene žice u Wheatstoneov most

provoditi mjerenje iznosi 0.20 m/s, a maksimalna brzina iznosi 200 m/s. Ovim osjetnikom je moguće mjeriti pojave s frekvencijom do 90 kHz, a isključivo je namijenjen mjerenjima u zraku. Trostruka užarena žica Dantec 55P91 je prikazana na slici 4.15.



Slika 4.15: Trostruka užarena žica Dantec 55P91

Užarena žica je tijekom mjerenja priključena na anemometar AALAB AN 1003, prikazan na slici 4.16. Anemometar ima 10 kanala i vlastito napajanje strujom,



Slika 4.16: AALAB AN 1003 anemometar konstantne temperature (CTA)

te sadrži testni modul s pravokutnim generatorom signala za podešavanje granične frekvencije, davač referentnog napona i mjerni uređaj napona za uravnoteženje mjernog mosta s digitalnim pokazivačem. Svaki kanal se u osnovi sastoji od Wheatstoneovog mosta, niskopropusnog (engl. low-pass) filtera i pojačala. Filter se sastoji od dva pojedinačna niskopropusna filtera, a služi izbjegavanju pojave aliasinga kod analize rezultata mjerenja u frekvencijskoj domeni. Sustav za akviziciju rezultata mjerenja se sastoji od osobnog računala i 12-bitne kartice za A/D konverziju s mogućnosti odabira faktora pojačanja, tip Data Translation DT2821. Izlazne vrijednosti anemometra su tri različita napona, koji se uz pomoć usporedbe i interpolacije s rezultatima kalibriranja pretvaraju u mjerne rezultate.

Mjerenja su provedena pri frekvenciji uzorkovanja 1.25 kHz uz vrijeme akvizicije 150 s i niskopropusni filter kod 625 Hz. Uz frekvenciju uzorkovanja 1.25 kHz se analogni rezultat mjerenja brzine vrlo dobro može predočiti diskretnim vrijednostima. Odabirom vremena akvizicije 150 s se izbjegava utjecaj niskofrekventnih oscilacija vrijednosti brzine na iznos osrednjene vrijednosti brzine. Uoči svakog mjerenja brzine u zračnom tunelu proveden je postupak kalibracije užarene žice u kalibracionom kanalu. Kalibracija se provodi za 20

različitih unaprijed poznatih vrijednosti brzine nastrujavanja i za 252 različita kuta nastrujavanja. Kalibracioni kanal je prikazan na slici 4.17.

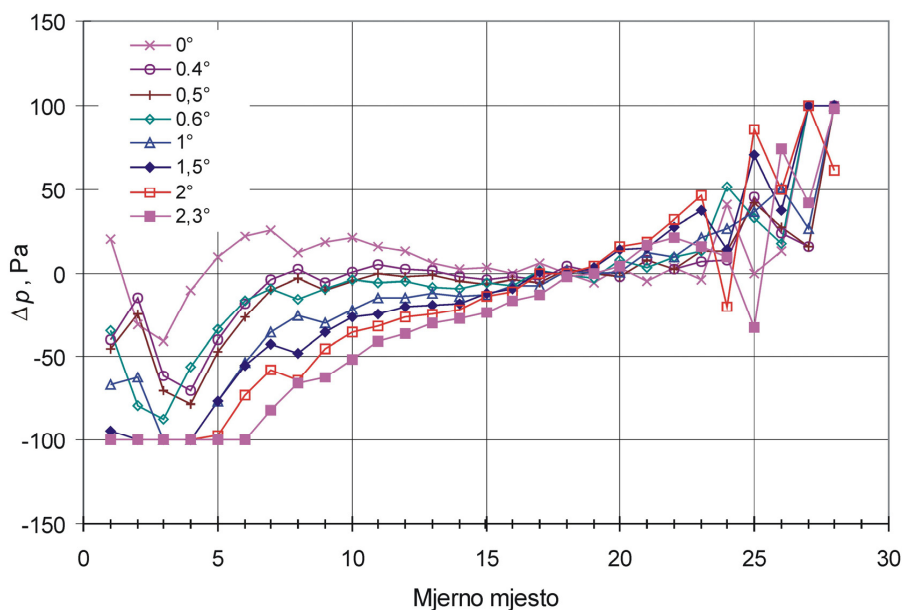


Slika 4.17: Kalibracioni kanal

4.3.2. Mjerenje tlaka

Mjerenje profila statičkog tlaka duž mjerne sekcije zračnog tunela provodi se uređajem Scanivalve. U Scanivalve uređaju su smještene tri diferencijalna osjetnika tlaka i tri ventila. Tlak se mjeri s diferencijalnim osjetnikom tlaka tipa "LPX 5480", čije je mjerno područje 100 Pa. Odstupanje osjetnika iznosi maksimalno ± 5 Pa. Ventili služe privođenju tlaka s određenog mjernog mjesta na unaprijed određeni osjetnik tlaka. Ovim se uređajem može provoditi mjerenje tlaka na ukupno 141 mjernom mjestu, a od toga se na tri mjerna mjesta mjerenje može provoditi istovremeno. Sustav je podijeljen u tri odvojene cjeline. Svaka se sastoji od jednog osjetnika tlaka, jednog ventila i 47 kanala. Mjerenje

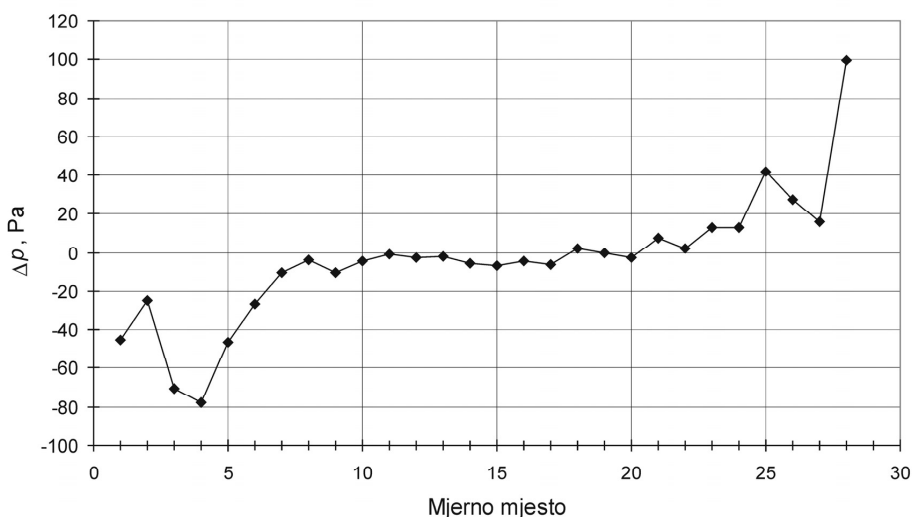
u svakoj od ovih cjelina se provodi u koracima, odnosno u jednom mjernom mjestu za drugim. Upravljanje procesom mjerenja i obrada podataka provode se putem osobnog računala. Scanivalve sustavom se provode mjerenja statičkog tlaka u pojedinim mjernim točkama istovremeno s mjerenjem referentnog statičkog tlaka. U stropu koji je podesiv po visini je u uzdužnom smjeru smješteno 28 mjernih mjesta, u razmacima od 0.7 m. Mjerna mjesta su pneumatskim crijevima povezana s mjernim uređajem. Numeracija počinje s brojem 1 na početku mjerne sekcije, a završava s brojem 28 na kraju mjerne sekcije. Mjerno mjesto 18, koje se nalazi u sredini mjerne sekcije, je referentno mjerno mjesto, s čijim se rezultatima uspoređuju rezultati mjerenja u preostalim mjernim mjestima. Kao primjer su na slici 4.18 prikazani profili statičkog tlaka na stropu mjerne sekcije ovisno o kutu nagiba stropa za granični sloj $\alpha = 0.21$ u mjerilu 1:500.



Slika 4.18: Profili statičkog tlaka na stropu mjerne sekcije ovisno o kutu nagiba stropa (granični sloj $\alpha = 0.21$, mjerilo 1:500)

U početnom se dijelu mjerne sekcije zračnog tunela nalaze objekti potrebni za generiranje graničnog sloja. Oni povećavaju stupanj začepljenosti mjerne

sekcije zračnog tunela na početku mjerne sekcije, što rezultira lokalnim povećanjem brzine strujanja zraka i padom statičkog tlaka. Iza mjernog mjesta br. 20 pod mjerne sekcije nije prekriven podnom hrapavosti. Stoga je stupanj začepljenosti u tom dijelu mjerne sekcije manji u odnosu na dio u kojem je pod prekriven podnom hrapavosti, što uzrokuje lokalno smanjenje brzine i prirast statičkog tlaka. Pri kutu nagiba 0.5° je gradijent statičkog tlaka na stropu mjerne sekcije zračnog tunela minimalan i osjetno je manji od dopuštenih vrijednosti, prikazano na slici 4.19.



Slika 4.19: Profil statičkog tlaka na stropu mjerne sekcije pri kutu nagiba stropa 0.5° (granični sloj $\alpha = 0.21$, mjerilo 1:500)

Stoga su daljnja istraživanja strukture navedenog graničnog sloja provedena pri kutu nagiba 0.5° . Isti postupak je proveden kod generiranja svakog pojedinog graničnog sloja. Odabrana frekvencija uzorkovanja iznosi 100 Hz, a vrijeme akvizicije je 10 s.

Kalibracija osjetnika za mjerenje statičkog tlaka u stropu mjerne sekcije zračnog tunela se provodi uz pomoć Betzovog manometra. Maksimalno odstupanje izmjerenih vrijednosti u odnosu na aproksimirani pravac pri postupku kalibracije iznosi $3.05 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$ u mjernom području $-10 \text{ V} \div 10 \text{ V}$.

5. Rezultati i diskusija

U zračnom tunelu je generiran 41 model atmosferskog graničnog sloja, a glavne karakteristike su prikazane u tablicama 5.1, 5.2 i 5.3.

$M = 1:500, \delta_m = 1 \text{ m}$						
Barijera	Podna hrapavost	α	$z_{0p}, \text{ m}$	$d, \text{ m}$	$\bar{u}_\delta, \text{ m/s}$	Slika
1	R1	0.27	0.050	4.50	6.500	A1
2	R1	0.23	0.635	1.26	11.968	A2
3	R1	0.29	1.255	2.87	12.135	A3
1	R2	0.26	0.785	0.00	12.012	A4
1	R3	0.27	0.745	5.00	12.037	A5
3	R3	0.23	0.110	15.00	12.004	A6
2	R3	0.22	0.615	1.00	11.639	A7
1	R4	0.21	0.336	1.00	11.653	A8
3	R4	0.21	0.424	1.00	11.535	A9
4	R4	0.21	0.410	1.00	11.258	A10
5	R4	0.21	0.225	5.00	13.363	A11
6	R4	0.21	0.412	1.00	11.466	A12
7	R4	0.23	0.269	1.00	13.100	A13
8	R4	0.21	0.250	1.00	13.197	A14
9	R4	0.23	0.265	1.00	13.063	A15
10	R4	0.22	0.186	1.00	13.124	A16
11	R4	0.22	0.313	1.00	13.101	A17
5	R6	0.35	2.345	5.70	13.682	A18
5	R7	0.17	0.134	1.00	17.933	A19
5	R9	0.15	0.051	1.50	17.292	A20
3	R9	0.14	0.009	0.05	16.355	A21
5	R8	0.15	0.057	0.50	16.929	A22
5	R5	0.27	0.910	5.00	13.590	A23
5	R10	0.17	0.017	0.00	16.924	A24

Tablica 5.1: Vrijednosti bitnih parametara za modele atmosferskog graničnog sloja u mjerilu 1:500

Modeli atmosferskog graničnog sloja koji zadovoljavaju postavke zadane u uvodnom dijelu rada ($\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35 u mjerilima 1:500, 1:333 i 1:250) i najbolje se podudaraju sa zadanom strukturom strujanja u prirodi predmet su diskusije u ovom poglavlju, a njihove karakteristike su u tablicama 5.1, 5.2 i 5.3 prikazane u osjenčenim poljima.

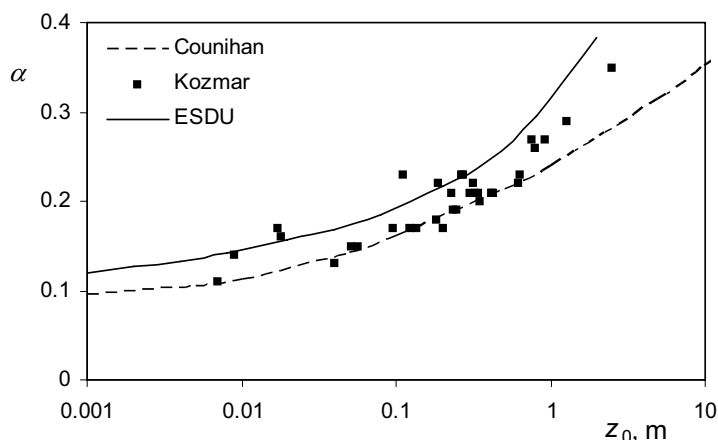
$M = 1:333, \delta_m = 1.5 \text{ m}$						
Barijera	Podna hrapavost	α	$z_{0p}, \text{ m}$	$d, \text{ m}$	$\bar{u}_\delta, \text{ m/s}$	Slika
12	R16	0.17	0.122	3.16	20.283	A25
12	R13	0.19	0.231	3.83	20.469	A26
13	R13	0.18	0.181	1.00	17.960	A27
14	R13	0.17	0.095	0.86	18.250	A28
14	R11	0.13	0.040	0.00	17.503	A29
13	R7	0.14	0.005	0.00	18.065	A30
14	R10	0.11	0.007	0.00	17.755	A31
14	R12	0.16	0.018	0.00	17.417	A32
13	R15	0.21	0.322	10.00	20.747	A33
13	R14	0.20	0.345	0.00	17.626	A34
13	R17	0.35	2.493	5.24	20.490	A35
12	R17	0.35	2.692	6.99	20.485	A36

Tablica 5.2: Vrijednosti bitnih parametara za modele atmosferskog graničnog sloja u mjerilu 1:333

$M = 1:250, \delta_m = 2 \text{ m}$						
Barijera	Podna hrapavost	α	$z_{0p}, \text{ m}$	$d, \text{ m}$	$\bar{u}_\delta, \text{ m/s}$	Slika
15	R17	0.35	2.335	7	24.000	A37
15	R18	0.44	0.005	9.55	16.000	A38
15	R19	0.21	0.301	6	22.000	A39
15	R15	0.19	0.245	8	22.000	A40
15	R13	0.17	0.201	0.5	21.000	A41

Tablica 5.3: Vrijednosti bitnih parametara za modele atmosferskog graničnog sloja u mjerilu 1:250

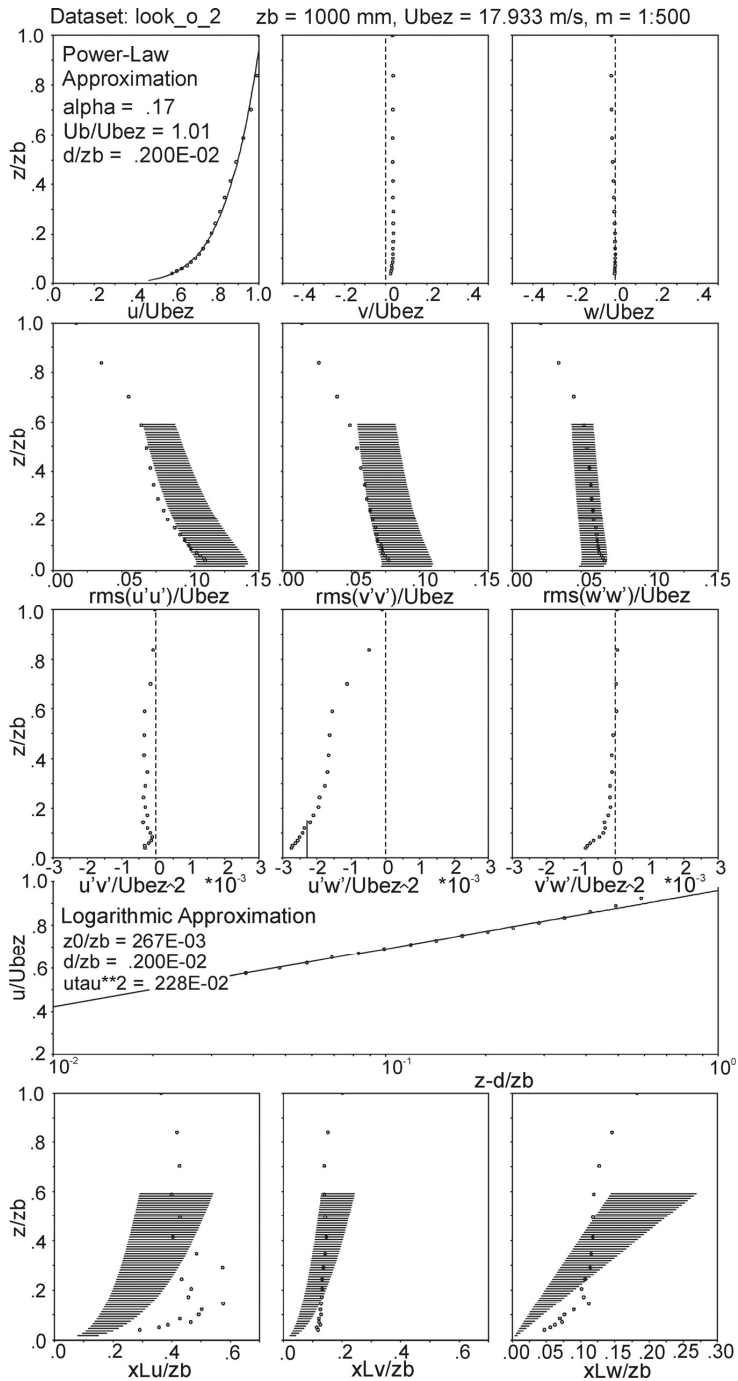
Usporedba ovisnosti vrijednosti eksponenta zakona potencije α o iznosu aerodinamičke duljine hrapavosti z_0 kod generiranih graničnih slojeva s rezultatima istraživanja drugih autora u zračnom tunelu, prema Counihan [28], i rezultatima mjerenja u prirodi, prema ESDU [32], je prikazana na slici 5.1. Može se primijetiti da se rezultati vlastitih istraživanja nalaze između rezultata mjerenja drugih autora u zračnom tunelu i u prirodi. Strukture strujanja svih graničnih slojeva su prikazane u prilogu i predstavljaju temelj za buduća modelska ispitivanja.



Slika 5.1: Usporedba α/z_0 kod generiranih graničnih slojeva u okviru ovog rada s rezultatima mjerenja drugih autora

Kao primjer strukture rezultata mjerenja na slici 5.2 je prikazan model atmosferskog graničnog sloja s eksponentom zakona potencije $\alpha = 0.17$ u mjerilu 1:500 uz korištenje barijere 5 i podne hrapavosti R7, a dane su vrijednosti sljedećih parametara:

1. red: Profili osrednjenih vrijednosti komponenti brzine u x, y i z smjeru, normirani s osrednjenom vrijednosti brzine u x smjeru na gornjem rubu graničnog sloja ($U_{bez} \equiv \bar{u}_\delta$, $z_b \equiv \delta$). Puna linija u dijagramu predstavlja aproksimirani zakon potencije određen metodom najmanjih kvadrata, prema Ilg [50].
2. red: Profili intenziteta turbulencije u x, y i z smjeru. Normiranje je izvršeno s \bar{u}_δ . Osjenčeni pojas predstavlja područje unutar kojeg bi se trebali nalaziti rezultati mjerenja u skladu s rezultatima mjerenja u prirodi, prema ESDU [31]. Granice osjenčenog područja predstavljaju vrijednosti koje za $\pm 15\%$ (x i z smjer), odnosno $\pm 20\%$ (y smjer) odstupaju od osrednjenih vrijednosti rezultata mjerenja iz prirode za određeni tip terena.
3. red: Profili turbulentnog (Reynoldsovog) tangencijalnog naprezanja (korelacije $\overline{u'v'}$, $\overline{u'w'}$ i $\overline{v'w'}$). Normiranje je izvršeno s \bar{u}_δ^2 .



Slika 5.2: Model atmosferskog graničnog sloja ($\alpha = 0.17$, mjerilo 1:500, barijera 5, podna hrapavost R7)

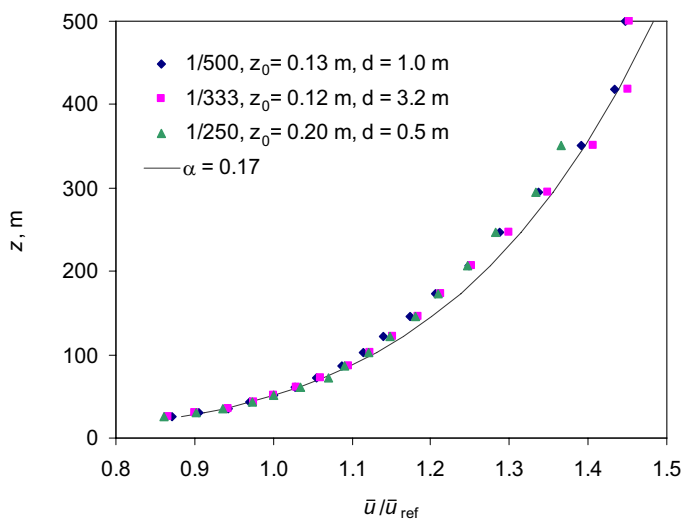
4. red: Profil osrednjenih vrijednosti brzine u x smjeru, prikazano u logaritamskom mjerilu. Normiranje je izvršeno s \bar{u}_δ . Puna linija u dijagramu predstavlja aproksimirani zakon potencije određen metodom najmanjih kvadrata, prema Ilg [50].
5. red: Profili integralne duljinske mjere turbulencije u x, y i z smjeru ($L_{u,x}$, $L_{u,y}$, $L_{u,z}$). Osjenčeni pojas predstavlja područje unutar kojeg bi se trebali nalaziti rezultati mjerenja u skladu s rezultatima mjerenja u prirodi, prema ESDU [31], [32], [51]. Granice osjenčenog područja predstavljaju vrijednosti koje za $\pm 30\%$ odstupaju od osrednjenih vrijednosti rezultata mjerenja iz prirode za određeni tip terena.

U okviru diskusije se razmatraju vrijednosti sljedećih parametara:

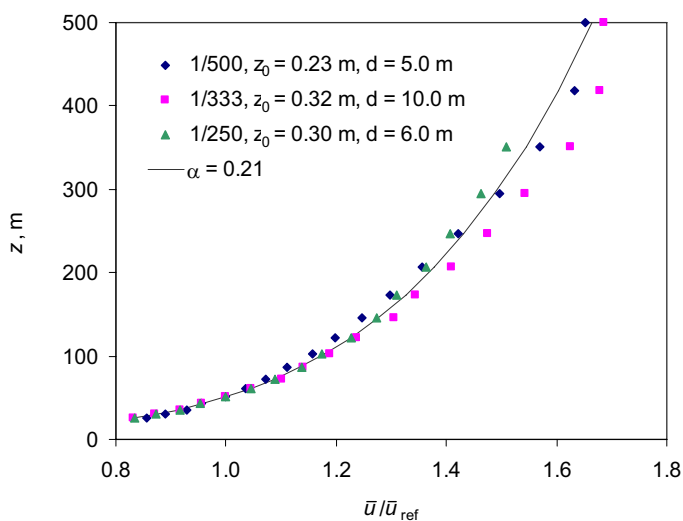
- osrednjene vrijednosti komponenti brzine strujanja u x smjeru,
- intenzitet turbulencije u x, y i z smjeru,
- tangencijalna komponenta Reynoldsovih naprezanja $-\overline{\rho u'w'}$,
- integralna duljinska mjera turbulencije u x smjeru,
- spektralna raspodjela kinetičke energije turbulentnih pulzacija u x smjeru.

5.1. Profili osrednjenih brzina

Razmatrani su isključivo profili osrednjenih brzina u x smjeru, budući da su osrednjene vrijednosti brzine u poprečnom i vertikalnom smjeru vrlo male i mogu se zanemariti. Vrijednosti osrednjenih brzina u x smjeru normirane su s osrednjenom vrijednosti brzine u x smjeru na visini koja u skladu s mjerilom odgovara visini 50 m u prirodi. Puna linija u dijagramu označuje aproksimirani zakon potencije. Visine mjernih mjesta, z_0 i d su preslikani na prototip s obzirom na mjerilo simulacije. Profili osrednjenih vrijednosti brzine za svaki pojedini granični sloj ($\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35) u tri različita mjerila (1:500, 1:333 i 1:250) su prikazani na slici 5.3, 5.4 i 5.5. Razlike iznosa brzine u donjem dijelu graničnog sloja (do približno 200 m) ovisno o mjerilu za granični sloj $\alpha = 0.17$ su zanemarivo male, slika 5.3. U gornjem dijelu su razlike veće, pri čemu su

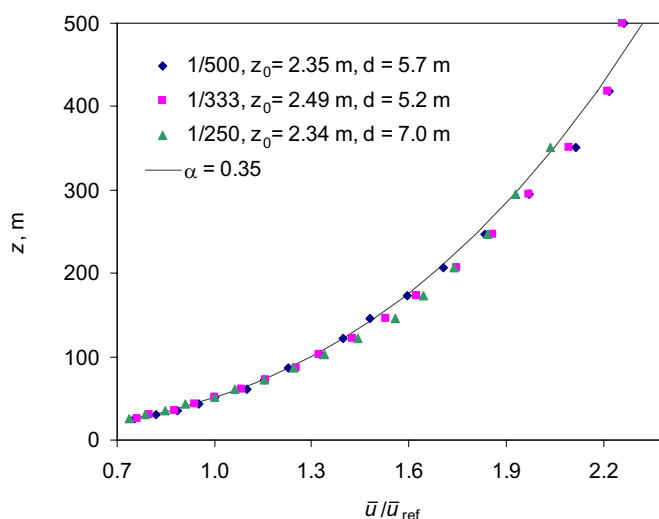


Slika 5.3: Profil osrednjenih brzina ($\alpha = 0.17$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)



Slika 5.4: Profil osrednjenih brzina ($\alpha = 0.21$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)

najmanje vrijednosti registrirane u mjerilu 1:250. Kod graničnog sloja $\alpha = 0.21$ razlike izmjerenih vrijednosti su zanemarivo male do visine 50 m, slika 5.4. U gornjem dijelu profila razlike su veće, a najmanji iznosi brzine ponovo su zabilježeni u mjerilu 1:250. Slična tendencija se ponavlja i za granični sloj $\alpha = 0.35$, slika 5.5.

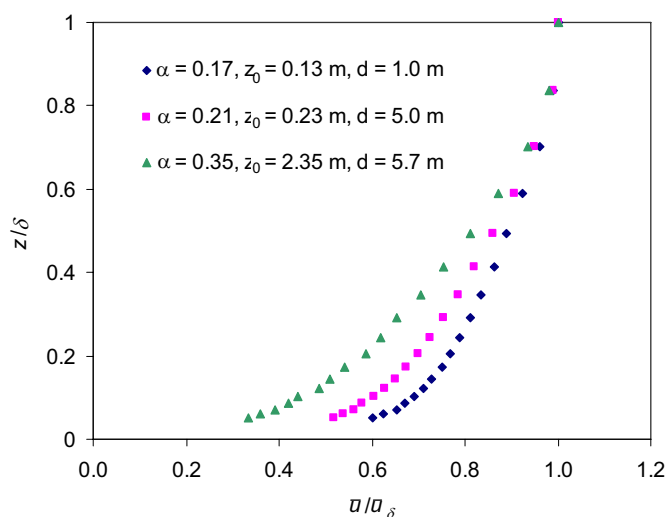


Slika 5.5: Profil osrednjenih brzina ($\alpha = 0.35$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)

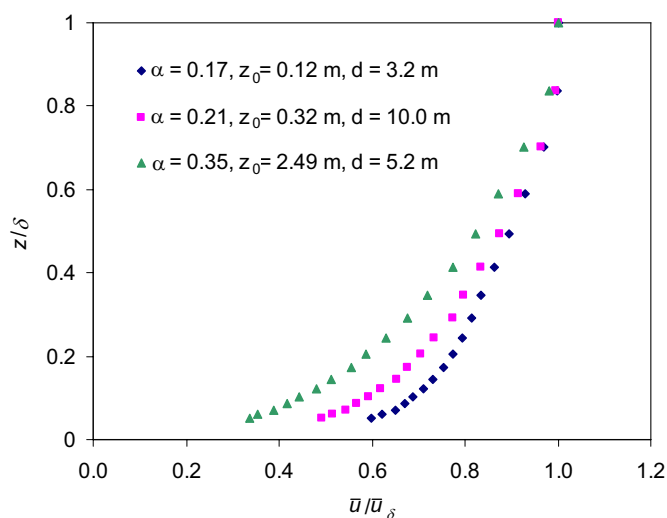
Kod modeliranja atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu cilj je postizanje optimalne kombinacije vrijednosti svih relevantnih parametara koji opisuju strukturu graničnog sloja. Potpuno je nemoguće varirati vrijednost jednog parametra, a da pritom vrijednosti ostalih parametara ostanu nepromijenjene. U većini slučajeva kod poboljšavanja vrijednosti jednog parametra dolazi do pogoršavanja vrijednosti ostalih parametara. Tako je npr. u mjerilu 1:500 odabrana nešto viša barijera u odnosu na ostala dva mjerila. To je učinjeno s ciljem postizanja povoljnije strukture turbulencije u donjem dijelu graničnog sloja. Posljedica su niže osrednjene vrijednosti brzine u srednjem dijelu profila (50 do 200 m) u odnosu na ostala dva mjerila za sva tri granična sloja, koje se lošije podudaraju sa zakonom potencije.

Na stropu mjerne sekcije nastaje tanki granični sloj, koji usporava strujanje u gornjem dijelu modela atmosferskog graničnog sloja. Granični sloj na stropu ovisno o mjerilu simulacije ima različite debljine preneseno na prototip (najveća debljina u mjerilu 1:250, a najmanja u mjerilu 1:500). Stoga su i brzine u gornjem dijelu graničnog sloja najniže u mjerilu 1:250, budući da granični sloj koji nastaje na stropu u mjerilu 1:250 najviše zadire u model atmosferskog graničnog sloja (strop mjerne sekcije se preneseno u prirodu nalazi u mjerilu 1:500 na visini 900 m, u mjerilu 1:333 na visini 600 m i u mjerilu 1:250 na visini

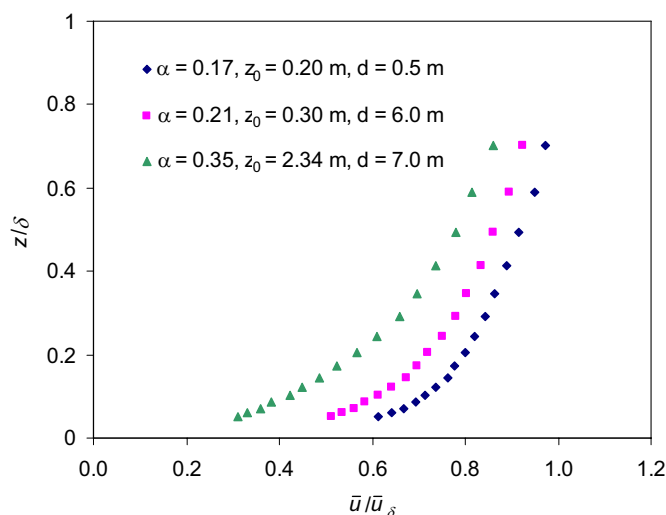
450 m). Iz slika 5.6, 5.7 i 5.8 se može procijeniti utjecaj strukture podne hrapavosti na osrednjene vrijednosti brzine. Na navedenim slikama su prikazani profili osrednjene brzine \bar{u} normirane s brzinom \bar{u}_δ na gornjem rubu graničnog sloja. U mjerilu 1:250 se brzina \bar{u}_δ određuje ekstrapolacijom iz zakona potencije. Struktura podne hrapavosti definirana aerodinamičkom duljinom



Slika 5.6: Profil osrednjenih brzina (mjerilo 1:500, $\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35)



Slika 5.7: Profil osrednjenih brzina (mjerilo 1:333, $\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35)



Slika 5.8: Profil osrednjenih brzina (mjerilo 1:250, $\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35)

hrapavosti z_0 ima najveći utjecaj na strukturu strujanja. Uslijed povećanog trenja struje zraka s podlogom kod veće visine i gustoće raspodjele elemenata podne hrapavosti (veći z_0), strujanje biva usporeno, odnosno dolazi do smanjenja osrednjene vrijednosti brzine. To je posebno izraženo u donjem dijelu graničnog sloja, a utjecaj podne hrapavosti postupno opada s povećanjem udaljenosti struje zraka od podloge. Potvrđena je poznata činjenica da je pri manje hrapavim podlogama profil brzine puniji.

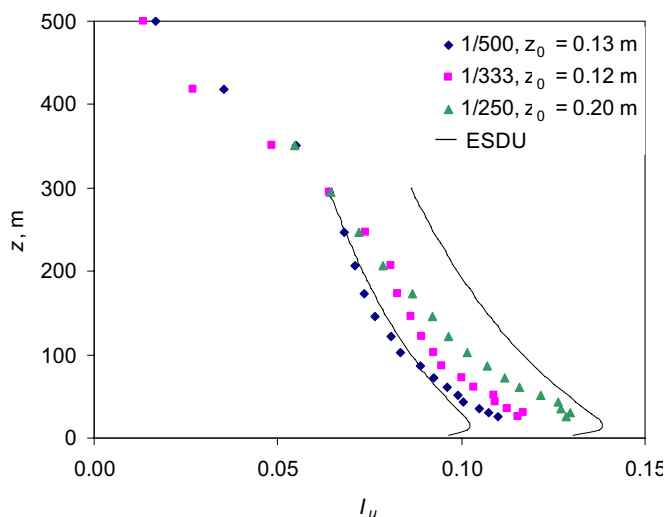
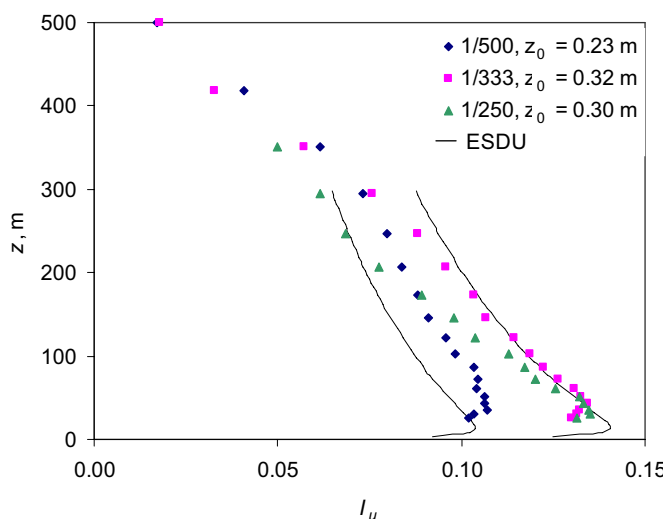
5.2. Intenzitet turbulencije

Intenzitet turbulencije predstavlja mjeru pulzacija brzine na određenoj visini unutar graničnog sloja u odnosu na odabranu osrednjenu vrijednost brzine, tzv. referentnu brzinu. Rezultati mjerenja intenziteta turbulencije u prirodi, prema ESDU [31], su normirani brzinom \bar{u}_δ na rubu graničnog sloja. Na isti način se normiraju i rezultati mjerenja u zračnom tunelu u okviru ovog rada. Odnosi intenziteta turbulencije I_v/I_u i I_w/I_u u svim konfiguracijama približno odgovaraju prosječnim rezultatima mjerenja drugih autora, prema Counihan [28] ($I_u : I_v : I_w = 1 : 0.75 : 0.5$), prikazano u tablici 5.4.

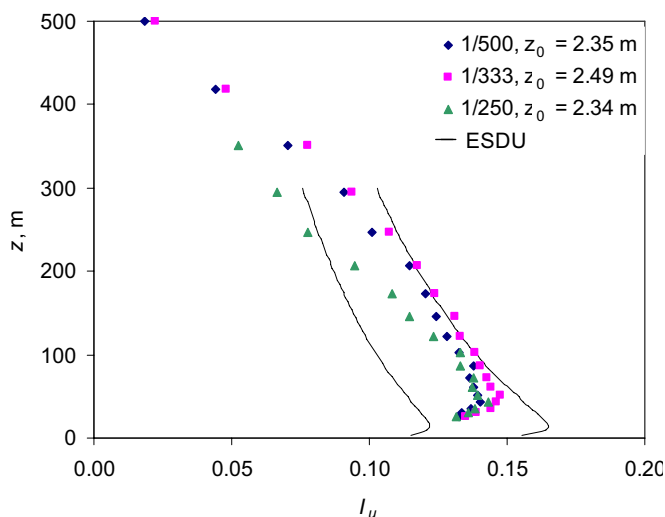
Mjerilo	Granični sloj	z/δ	I_v/I_u	I_w/I_u
1:500	$\alpha = 0.17$	0.05	0.69	0.59
		0.10	0.73	0.62
		0.20	0.78	0.70
	$\alpha = 0.21$	0.05	0.69	0.53
		0.10	0.64	0.52
		0.20	0.67	0.58
	$\alpha = 0.35$	0.05	0.61	0.53
		0.10	0.65	0.57
		0.20	0.72	0.66
1:333	$\alpha = 0.17$	0.05	0.79	0.59
		0.10	0.78	0.61
		0.20	0.84	0.73
	$\alpha = 0.21$	0.05	0.76	0.59
		0.10	0.74	0.58
		0.20	0.81	0.66
	$\alpha = 0.35$	0.05	0.68	0.58
		0.10	0.70	0.58
		0.20	0.78	0.67
1:250	$\alpha = 0.17$	0.05	0.81	0.58
		0.10	0.84	0.64
		0.20	0.91	0.79
	$\alpha = 0.21$	0.05	0.77	0.58
		0.10	0.77	0.60
		0.20	0.83	0.72
	$\alpha = 0.35$	0.05	0.68	0.56
		0.10	0.73	0.60
		0.20	0.78	0.66

Tablica 5.4: Odnosi intenziteta turbulencije I_v/I_u i I_w/I_u u donjem dijelu graničnog sloja

Može se primijetiti da je odnos intenziteta turbulencije I_w/I_u pri vlastitim istraživanjima u svim konfiguracijama nešto veći u usporedbi s navedenim rezultatima drugih autora. Nadalje će biti razmatran isključivo intenzitet turbulencije u x smjeru, budući da su pulzacije brzine u uzdužnom smjeru I_u bitno važniji element strukture graničnog sloja u odnosu na pulzacije brzine u poprečnom i vertikalnom smjeru. Na slikama 5.9, 5.10 i 5.11 su prikazani profili intenziteta turbulencije I_u za svaki pojedini granični sloj ($\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35) u tri različita mjerila (1:500, 1:333 i 1:250).

Slika 5.9: Intenzitet turbulencije ($\alpha = 0.17$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)Slika 5.10: Intenzitet turbulencije ($\alpha = 0.21$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)

Pune linije označuju vrijednosti koje za $\pm 15\%$ odstupaju od prosječnih rezultata mjerenja iz prirode, a u skladu s ESDU propisima. Struktura podne hrapavosti ima najveći utjecaj na iznose intenziteta turbulencije, što je posebno izraženo u donjem dijelu graničnog sloja. S povećanjem visine i gustoće raspodjele

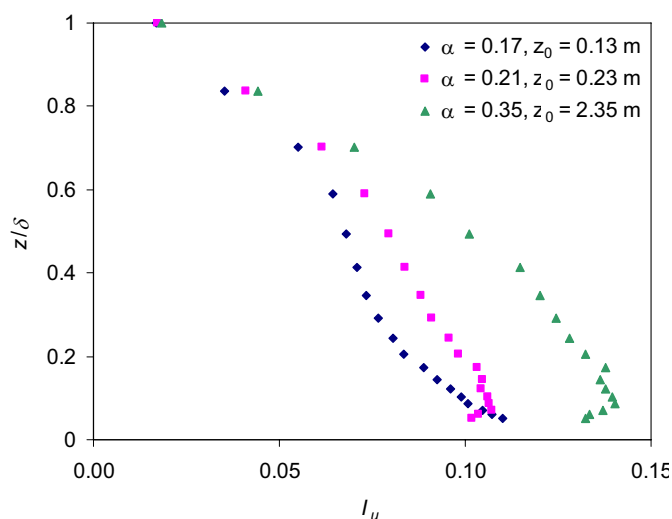


Slika 5.11: Intenzitet turbulencije ($\alpha = 0.35$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)

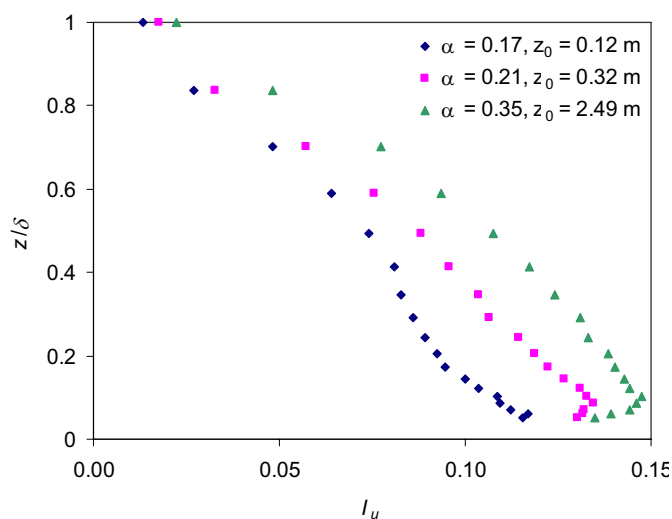
elemenata podne hrapavosti (veći z_0) povećava se iznos intenziteta turbulencije, kao rezultat intenzivnije izmjene impulsa između podloge i struje zraka. S povećanjem udaljenosti od podloge opada utjecaj podne hrapavosti, a povećava se utjecaj sekundarnog graničnog sloja na stropu mjerne sekcije. U mjerilu 1:250 intenzitet turbulencije u srednjem i gornjem dijelu graničnog sloja (od 50 m naviše) brže opada s povećanjem visine u odnosu na mjerila 1:333 i 1:500. Ovaj je fenomen izraženiji kod graničnih slojeva koji nastaju strujanjem iznad hrapavije podloge ($\alpha = 0.21$ i 0.35).

Tijekom modeliranja istog tipa graničnog sloja u tri različita mjerila nije bilo moguće postići istu vrijednost aerodinamičke duljine hrapavosti z_0 . Pritom se sve postignute vrijednosti z_0 nalaze u okviru rezultata mjerenja iz prirode i time zadovoljavaju zadane uvjete. Iako male, razlike u vrijednostima z_0 odražavaju se na profile intenziteta turbulencije. Tako je intenzitet turbulencije za isti tip graničnog sloja veći u mjerilu u kojem je postignuta veća vrijednost z_0 . Ova je pojava izraženija za granične slojeve $\alpha = 0.17$ ($z_0 = 0.12 \div 0.20$) i $\alpha = 0.21$ ($z_0 = 0.23 \div 0.32$) u odnosu na granični sloj $\alpha = 0.35$, kod kojeg su odstupanja vrijednosti z_0 bitno manja ($z_0 = 2.34 \div 2.49$), pa su i razlike vrijednosti intenziteta turbulencije u tri različita mjerila manje. Da bi se jasnije dokumentirao utjecaj strukture podne hrapavosti na vrijednosti intenziteta turbulencije, na slikama

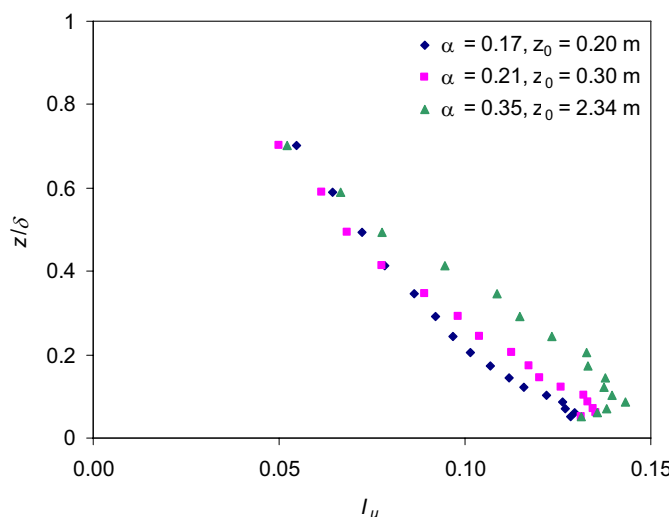
5.12, 5.13 i 5.14 su prikazani profili intenziteta turbulencije za sva tri tipa graničnog sloja ($\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35) u svakom pojedinom mjerilu.



Slika 5.12: Intenzitet turbulencije (mjerilo 1:500, $\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35)



Slika 5.13: Intenzitet turbulencije (mjerilo 1:333, $\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35)

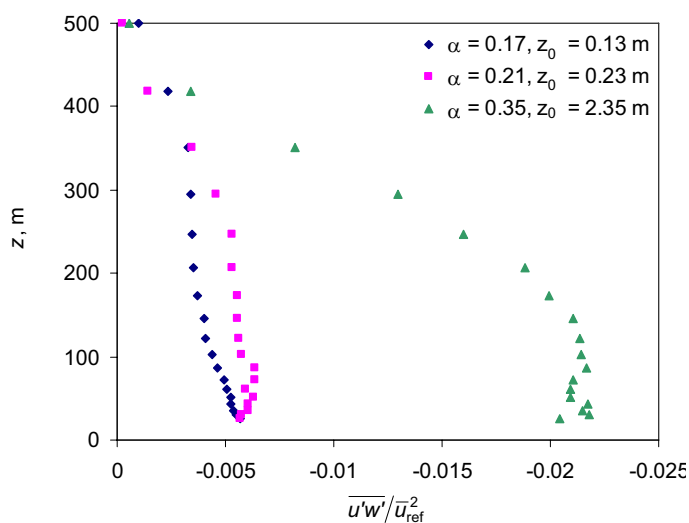
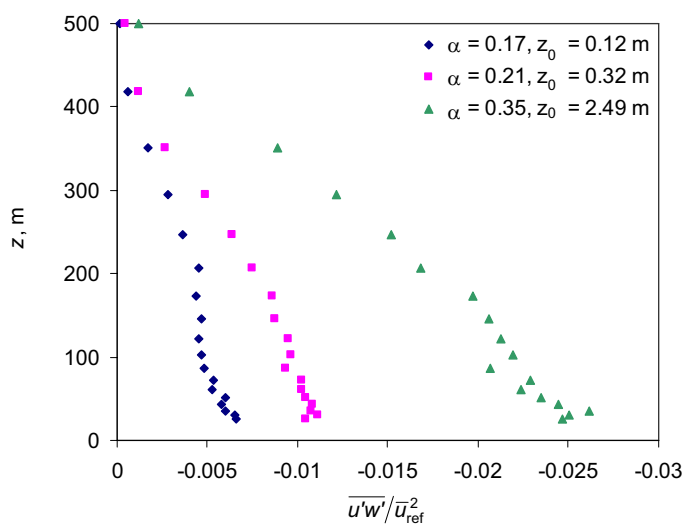


Slika 5.14: Intenzitet turbulencije (mjerilo 1:250, $\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35)

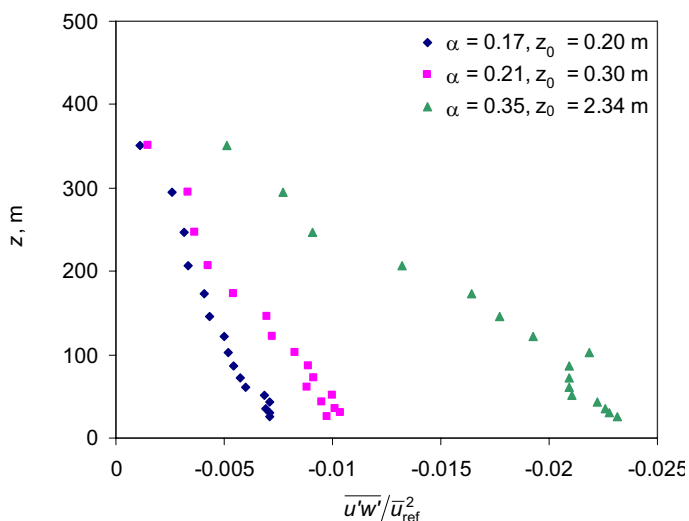
Jasno je vidljivo da je intenzitet turbulencije veći u konfiguracijama u kojima strujanje nastaje iznad hrapavije podloge, odnosno pri većoj vrijednosti z_0 . Razlike su veće u donjem dijelu graničnog sloja i opadaju s povećanjem visine, tj. smanjenjem utjecaja strukture podne hrapavosti na strujanje zraka.

5.3. Reynoldsovo naprezanje

Turbulentno (Reynoldsovo) tangencijalno naprezanje $-\rho \overline{u'w'}$ predstavlja mjeru za prijenos sila trenja s podloge na struju zraka. Razmatra se isključivo naprezanje $-\rho \overline{u'w'}$, budući da su iznosi naprezanja $-\rho \overline{u'v'}$ i $-\rho \overline{v'w'}$ vrlo mali i mogu se zanemariti. Izmjerene vrijednosti normirane su s kvadratom osrednjenom vrijednosti brzine u x smjeru na visini koja u skladu s mjerilom odgovara visini 50 m u prirodi ($\overline{u_{\text{ref}}}^2$). Profili Reynoldsovog naprezanja $\overline{u'w'}$ za tri tipa graničnog sloja ($\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35) u svakom pojedinom mjerilu prikazani su na slikama 5.15, 5.16 i 5.17. Jasno je vidljivo da se iznos Reynoldsovog naprezanja povećava s povećanjem hrapavosti podloge (veći

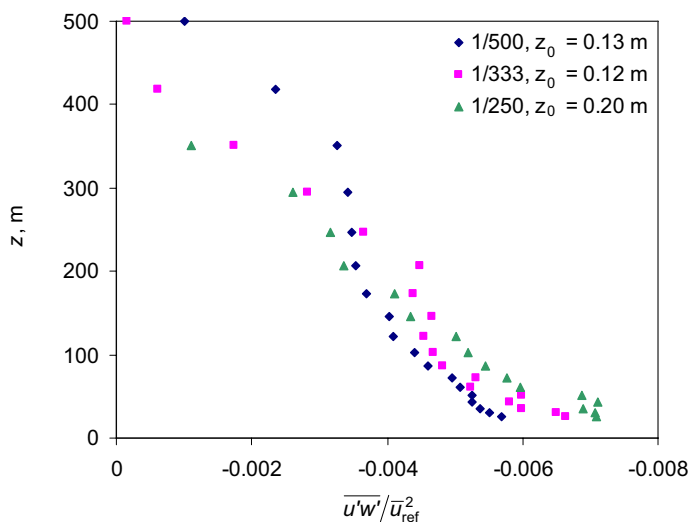
Slika 5.15: Reynoldsovo naprezanje (mjerilo 1:500, $\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35)Slika 5.16: Reynoldsovo naprezanje (mjerilo 1:333, $\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35)

z_0), kao rezultat povećanja trenja između podloge i struje zraka i intenzivnije izmjene uzdužnih pulzacija u vertikalnom smjeru. Tako je iznos Reynoldsovog naprezanja najveći za granični sloj $\alpha = 0.35$, a najmanji za $\alpha = 0.17$. U mjerilu 1:333 su razlike u strukturi podne hrapavosti (iznos z_0) najveće, što rezultira i najvećim razlikama vrijednosti Reynoldsovog naprezanja. To je još jedan

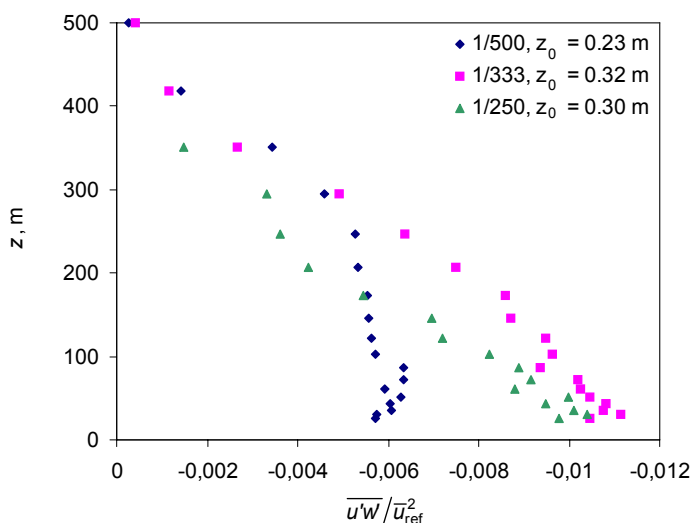
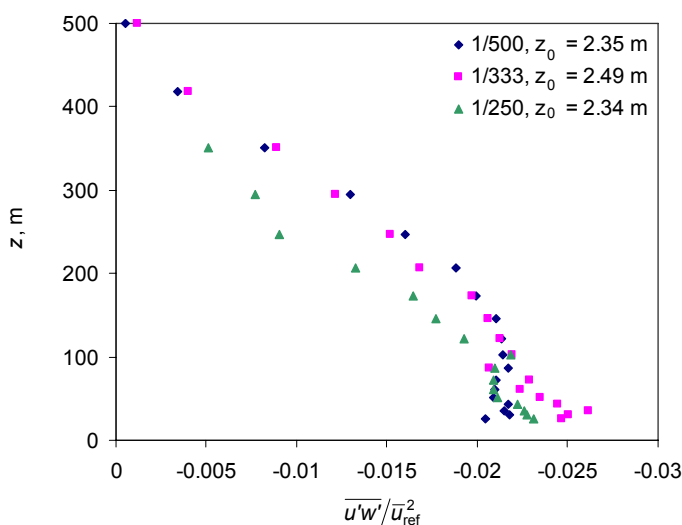


Slika 5.17: Reynoldsovo naprezanje (mjerilo 1:250, $\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35)

pokazatelj dominantne uloge strukture podne hrapavosti na strukturu turbulencije u donjem dijelu graničnog sloja. S povećanjem visine unutar graničnog sloja (udaljavanjem od podloge) razlike vrijednosti Reynoldsovog naprezanja za različite tipove graničnog sloja postaju sve manje, kao posljedica smanjenja utjecaja podloge. Na slikama 5.18, 5.19 i 5.20 su prikazani profili Reynoldsovog naprezanja za svaki pojedini tip graničnog sloja u tri različita mjerila.



Slika 5.18: Reynoldsovo naprezanje ($\alpha = 0.17$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)

Slika 5.19: Reynoldsovo naprežanje ($\alpha = 0.21$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)Slika 5.20: Reynoldsovo naprežanje ($\alpha = 0.35$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)

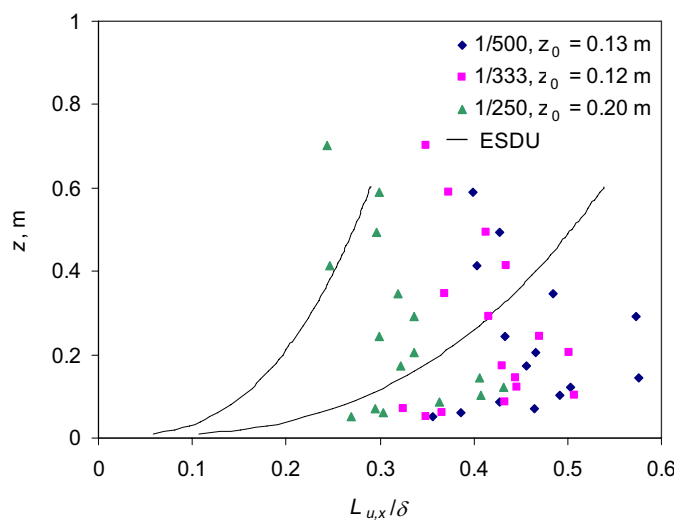
Iako su razlike u strukturi podne hrapavosti (iznos z_0) vrlo male, ipak u donjem dijelu graničnog sloja rezultiraju povećanjem Reynoldsovog naprežanja s povećanjem hrapavosti podloge. Ova je tendencija posebno izražena za granične slojeve $\alpha = 0.21$ i $\alpha = 0.35$, prikazano na slikama 5.19 i 5.20. U gornjem dijelu graničnog sloja utjecaj podloge opada, a dominantan postaje utjecaj mjerila simulacije. U većim mjerilima (npr. 1:250) je utjecaj sekundarnog

graničnog sloja veći u odnosu na manja mjerila (npr. 1:500), jer se sekundarni granični sloj nalazi unutar modela atmosferskog graničnog sloja. To rezultira slabijim transportom uzdužnih pulzacija u vertikalnom smjeru. U skladu s navedenim su iznosi Reynoldsovog naprezanja u gornjem dijelu modela atmosferskog graničnog sloja najmanji u mjerilu 1:250. Kod hrapavijih podloga (veći z_0) se javlja tendencija pojave područja s konstantnim vrijednostima Reynoldsovog naprezanja u blizini podloge. Ova je tendencija registrirana i u prirodi, prema ESDU [41], pa se područje konstantnosti vrijednosti Reynoldsovog naprezanja proteže npr. kod atmosferskog graničnog sloja koji nastaje strujanjem zraka iznad nenaseljene površine prekrivene niskim raslinjem do visine 30 m. Ovaj je pojas znatno veći kod atmosferskog graničnog sloja koji nastaje strujanjem zraka iznad gusto naseljene površine s visokim zgradama.

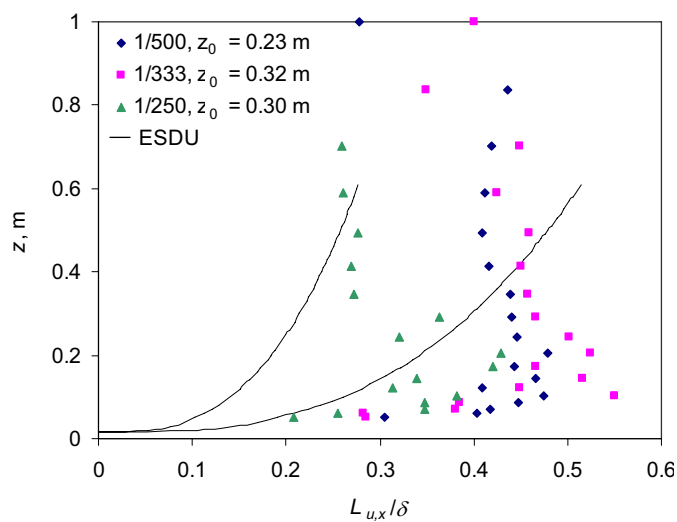
5.4. Integralna duljinska mjera turbulencije

Integralna duljinska mjera turbulencije predstavlja osrednjenu dimenziju vrtloga u x , y i z smjeru. Razmatra se isključivo integralna duljinska mjera turbulencije u x smjeru, budući da su dimenzije vrtloga u x smjeru $L_{u,x}$ bitno važniji element strukture graničnog sloja u odnosu na dimenzije vrtloga u poprečnom i vertikalnom smjeru. Rezultati su uspoređeni s rezultatima mjerenja u prirodi. Punim linijama su označene granice pojasa unutar kojeg bi se očekivano trebali nalaziti rezultati mjerenja i predstavljaju vrijednosti koje za $\pm 30\%$ odstupaju od osrednjenih vrijednosti rezultata mjerenja iz prirode, prema ESDU [31], [32], [51]. Na slikama 5.21, 5.22 i 5.23 su prikazani profili integralne duljinske mjere turbulencije u x smjeru $L_{u,x}$ za svaki pojedini granični sloj ($\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35) u tri različita mjerila (1:500, 1:333 i 1:250).

U zračnom tunelu nije moguće točno generirati integralne duljinske mjere turbulencije. Dva su bitna faktora koja onemogućavaju precizno modeliranje dimenzija vrtloga. Raspon dimenzija između najmanjih i najvećih vrtloga je u prirodi bitno veći u odnosu na zračni tunel, a gradijent brzine $\partial \bar{u} / \partial z$ u blizini

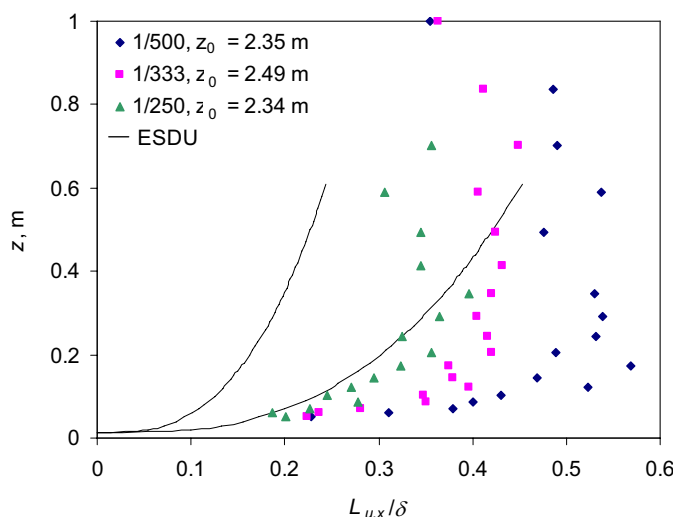


Slika 5.21: Integralna duljinska mjera turbulencije ($\alpha = 0.17$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)



Slika 5.22: Integralna duljinska mjera turbulencije ($\alpha = 0.21$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)

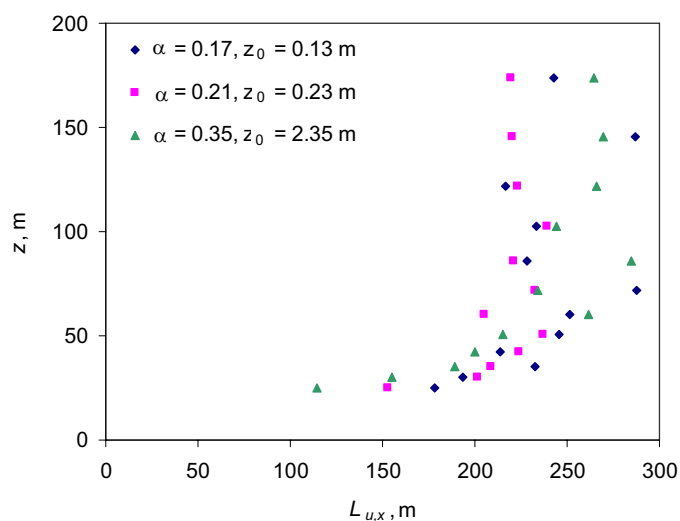
podloge je u zračnom tunelu značajno veći u usporedbi s gradijentom brzine u prirodi. Pod pretpostavkom da promjer najmanjih vrtloga u zračnom tunelu iznosi 1 mm, spektar veličina vrtloga preneseno u prirodu proteže se u mjerilu



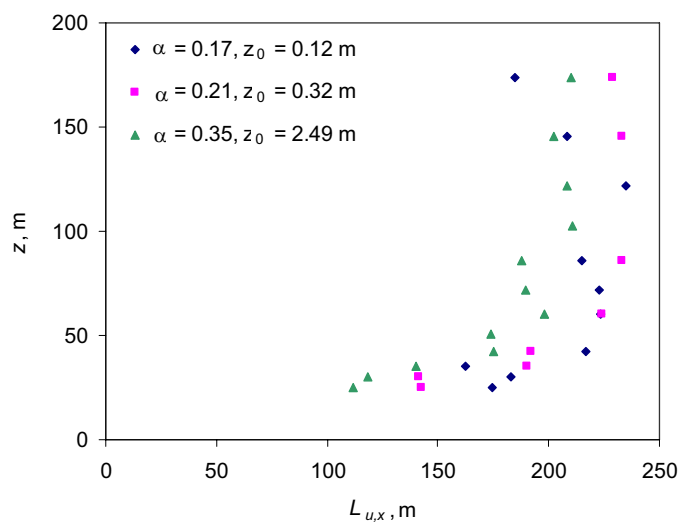
Slika 5.23: Integralna duljinska mjera turbulencije ($\alpha = 0.35$, mjerilo 1:500, 1:333 i 1:250)

1:250 od 250 mm do 500 m. Istom analogijom se u mjerilu 1:500 dimenzije vrtloga kreću u području 500 mm do 500 m. Pri proračunavanju srednje veličine vrtloga je, u skladu s navedenim, udio malih vrtloga u mjerilu 1:500 znatno manji u odnosu na mjerilo 1:250. U mjerilu 1:500 je "rupa" u području malih vrtloga (od minimalne dimenzije vrtloga u prirodi do promjera najmanjeg modeliranog vrtloga) znatno veća u odnosu na mjerilo 1:250. Stoga se može očekivati da u manjim mjerilima (npr. 1:500) integralna duljinska mjera turbulencije na određenoj visini unutar graničnog sloja bude veća u odnosu na veća mjerila simulacije (npr. 1:250). Navedeno potvrđuju i rezultati prikazani na slikama 5.21, 5.22 i 5.23.

Ovisnost iznosa integralne duljinske mjere turbulencije $L_{u,x}$ o strukturi podne hrapavosti u donjem dijelu graničnog sloja je prikazana na slikama 5.24, 5.25 i 5.26. Veličina vrtloga u blizini podloge ovisi u najvećoj mjeri o strukturi podne hrapavosti. S udaljavanjem od podloge se smanjuje utjecaj strukture podne hrapavosti na vrijednosti integralne duljinske mjere turbulencije $L_{u,x}$. U prirodi je veličina vrtloga na određenoj visini manja ukoliko je podloga hrapavija, prema ESDU [31]. Ova tendencija je potvrđena u donjem dijelu graničnog sloja (do visine približno 80 m) u svim mjerilima, prikazano na slikama 5.24, 5.25 i 5.26.

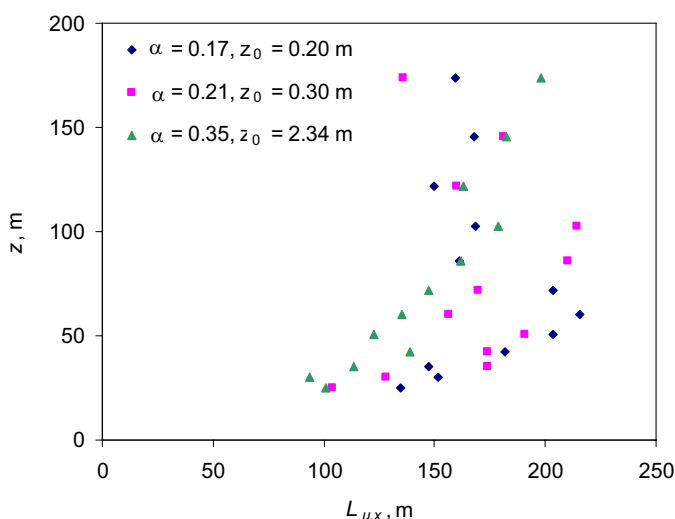


Slika 5.24: Ovisnost iznosa integralne duljinske mjere turbulencije $L_{u,x}$ o strukturi podne hrapavosti u mjerilu 1:500 u donjem dijelu graničnog sloja



Slika 5.25: Ovisnost iznosa integralne duljinske mjere turbulencije $L_{u,x}$ o strukturi podne hrapavosti u mjerilu 1:333 u donjem dijelu graničnog sloja

Integralne duljinske mjere turbulencije $L_{u,x}$ su za granični sloj $\alpha = 0.35$ manje u odnosu na ostala dva tipa graničnog sloja. Budući da su strukture strujanja za granične slojeve $\alpha = 0.17$ i $\alpha = 0.21$ dosta slične, ova tendencija za navedena



Slika 5.26: Ovisnost iznosa integralne duljinske mjere turbulencije $L_{u,x}$ o strukturi podne hrapavosti u mjerilu 1:250 u donjem dijelu graničnog sloja

dva granična sloja u mjerilima 1:500 i 1:333 nije zapažena. U mjerilu 1:250, u kojem su najpreciznije modelirani najmanji elementi strukture turbulencije, ova je tendencija jasno dokumentirana rezultatima mjerenja, odnosno vrijednosti $L_{u,x}$ su niže za granični sloj $\alpha = 0.17$ u odnosu na granični sloj $\alpha = 0.21$.

5.5. Spektralna raspodjela energije turbulentnih pulzacija

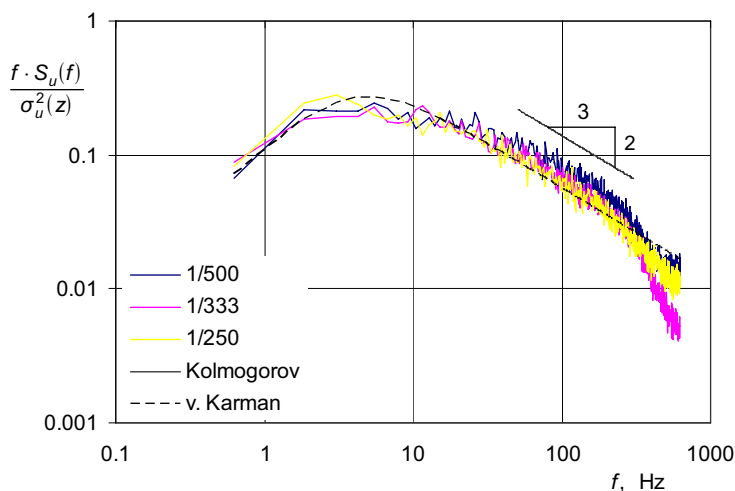
Turbulentne pulzacije brzine unutar graničnog sloja rezultat su superpozicije pulzacija svih prisutnih vrtloga unutar graničnog sloja. U skladu s navedenim se ukupna energija turbulentnih pulzacija može prikazati kao suma kinetičkih energija svih u strukturi strujanja prisutnih vrtloga. Budući da su za praktičnu primjenu najznačajnije pulzacije brzine u smjeru glavnog strujanja, u okviru diskusije se razmatraju isključivo spektri u x smjeru, čija se energija može prikazati izrazom

$$\overline{u'^2} = \int_0^{\infty} S_u(f) df, \quad (5.1)$$

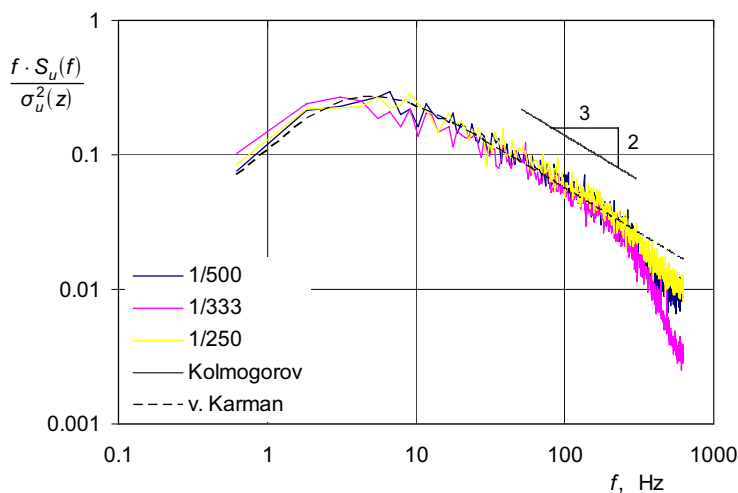
pri čemu je $S_u(f)$ spektralna gustoća energije turbulentnih pulzacija, a često se naziva i spektar snage. U okviru postupka spektralne analize se pulzacijska komponenta brzine u' , koja je diskretna funkcija vremena, korištenjem Fourierovih transformacija transformira u frekvencijsku domenu. Rezultat množenja Fourierovog transformata s njemu konjugiranim kompleksnim izrazom predstavlja spektar snage pulzacija brzine. Budući da je frekvencijska domena vrlo velika ($0.1 \div 625$ Hz) odabran je logaritamski način prikaza rezultata mjerenja. Ukoliko je i za prikaz vrijednosti normiranog spektra snage odabrano logaritamsko mjerilo, moguće je integracijom površine ispod krivulje odrediti ukupnu kinetičku energiju turbulentnih pulzacija na određenoj poziciji unutar graničnog sloja:

$$\int_0^{\infty} \frac{f \cdot S_u(f)}{\sigma_u^2} d(\ln f) = 1, \quad (5.2)$$

pri čemu $f \cdot S_u(f) / \sigma_u^2$ predstavlja normirani spektar snage. U okviru diskusije korišten je gore opisani način prikazivanja rezultata mjerenja. Vrlo je bitno ispitati strukturu turbulencije u donjem dijelu graničnog sloja (do 100 m visine), budući da se u tom području nalaze skoro sve poznate građevine. Stoga su u okviru diskusije razmatrani spektri kinetičke energije turbulencije na visini 30 m i 100 m. Rezultati mjerenja su uspoređeni s teoretskim modelima Kolmogorova (zakon $-2/3$) i von Karmana. Na slikama 5.27, 5.28, 5.29, 5.30, 5.31 i 5.32 su prikazani spektri za granične slojeve $\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35 na visinama 30 m i 100 m u tri različita mjerila (1:500, 1:333 i 1:250). Visine mjernih mjesta su preslikane na prototip s obzirom na mjerilo simulacije. Visoke frekvencije odgovaraju malim vrtlozima i obrnuto, niske frekvencije pridružene su velikim vrtlozima. Maksimalna vrijednost spektra snage nalazi se u području frekvencija 1 ± 10 Hz (područje produkcije kinetičke energije turbulencije). Poznato je da je gustoća energije najveća u području vrtloga nešto manjih dimenzija u odnosu na najveće vrtloge. U području frekvencija od 10 do 300 Hz odvija se kaskadni proces prijenosa kinetičke energije s većih na manje vrtloge (raspad većih vrtloga na manje). Na razini najmanjih vrtloga (frekvencije iznad 300 Hz) dolazi

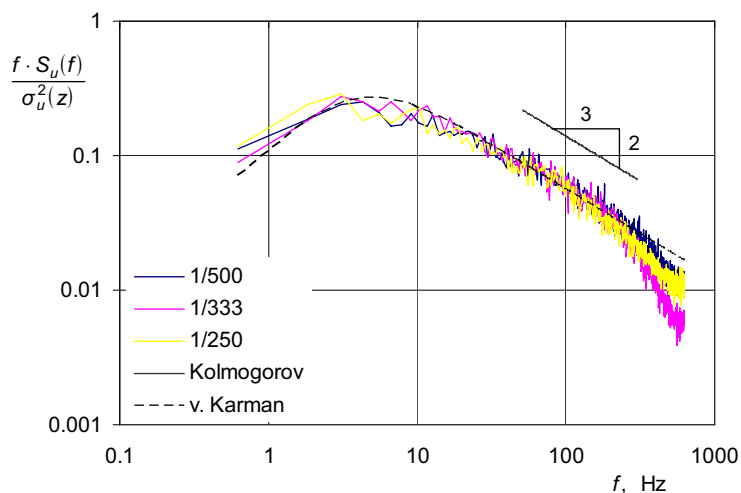


Slika 5.27: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije ($\alpha = 0.17$, $z = 30$ m)

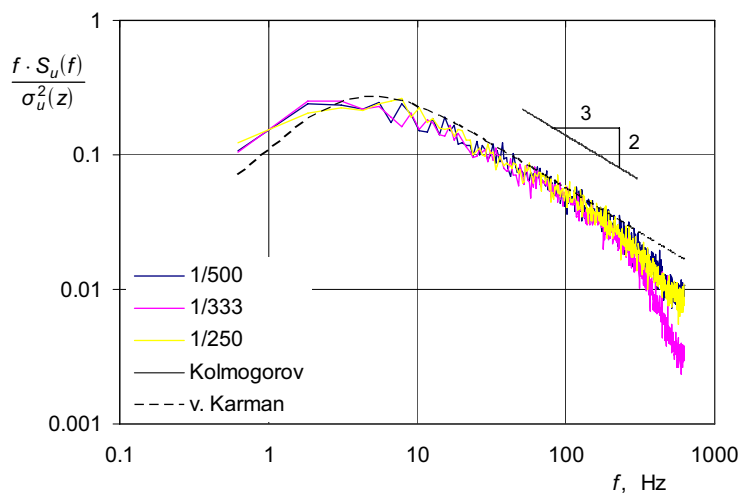


Slika 5.28: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije ($\alpha = 0.17$, $z = 100$ m)

do pretvorbe kinetičke energije turbulencije u toplinu (disipacija energije). Iz slika 5.27, 5.28, 5.29 i 5.30, koje se odnose na granične slojeve $\alpha = 0.17$ i $\alpha = 0.21$, vidljivo je da disipacija energije započinje pri nižim frekvencijama u mjerilu 1:333 u odnosu na mjerila 1:250 i 1:500.

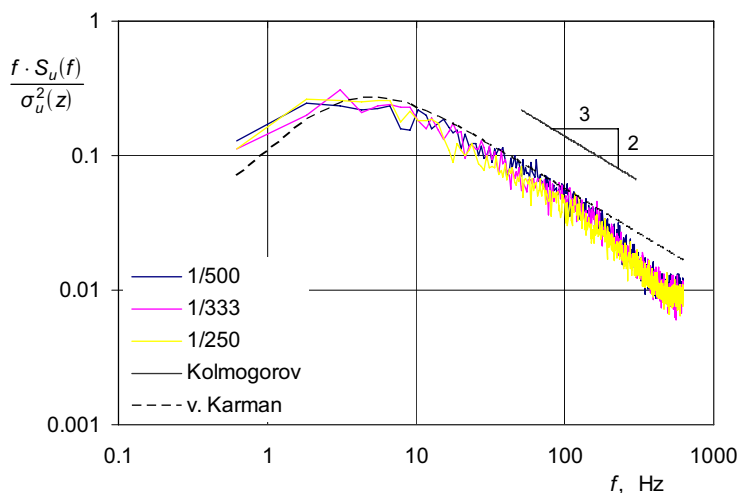


Slika 5.29: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije ($\alpha = 0.21$, $z = 30$ m)

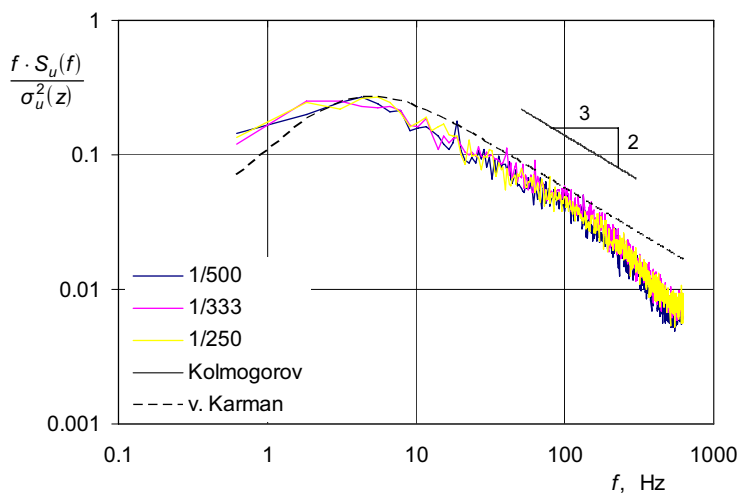


Slika 5.30: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije ($\alpha = 0.21$, $z = 100$ m)

Razlike u profilima spektara za isti tip graničnog sloja u različitim mjerilima su male. Može se zaključiti da pri točnom modeliranju ostalih parametara strukture turbulencije izbor mjerila nema utjecaja na izgled profila spektra kinetičke



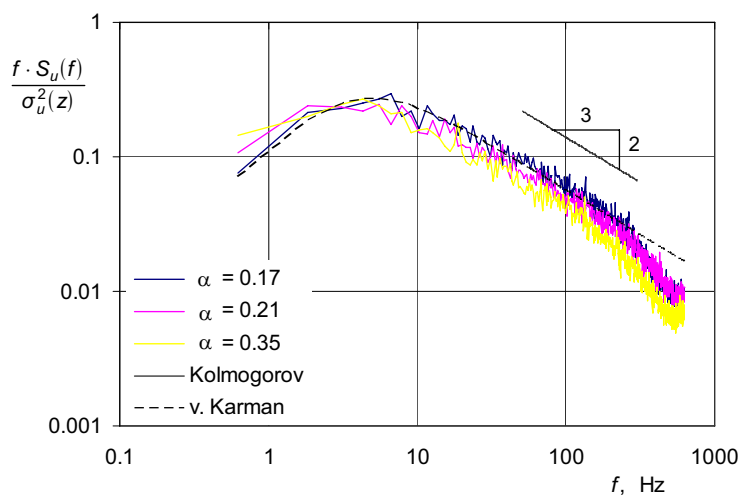
Slika 5.31: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije ($\alpha = 0.35$,
 $z = 30$ m)



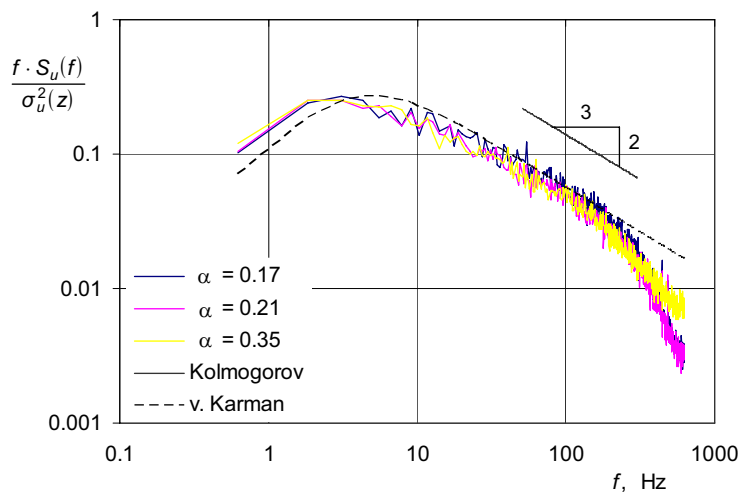
Slika 5.32: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije ($\alpha = 0.35$,
 $z = 100$ m)

energije turbulencije, ako se zanemari raniji početak zone disipacije u mjerilu 1:333 za granične slojeve $\alpha = 0.17$ i $\alpha = 0.21$. Za granični sloj karakteriziran velikom hrapavosti podloge ($\alpha = 0.35$) spektri se vrlo dobro podudaraju u sva tri mjerila.

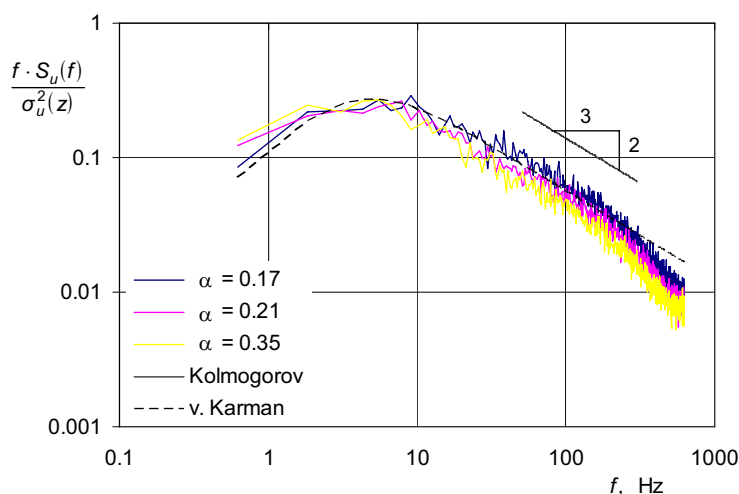
Na temelju istraživanja Davenporta [52], [53] i Panofskog [54], Counihan [3] zaključuje da na izgled profila spektra ne utječe struktura podloge. Navedeni su rezultati, s obzirom na izgled profila spektra, potvrđeni i rezultatima dobivenim u okviru ovog rada, koji su prikazani na slikama 5.33, 5.34 i 5.35.



Slika 5.33: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije (mjerilo 1:500, $z = 100$ m)



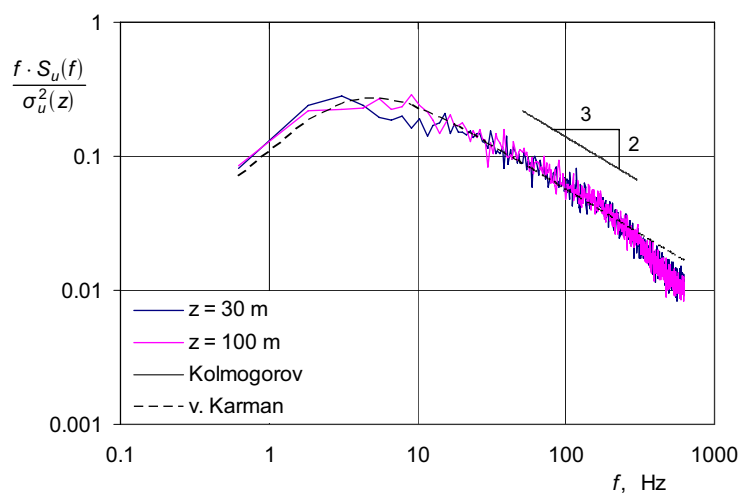
Slika 5.34: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije (mjerilo 1:333, $z = 100$ m)



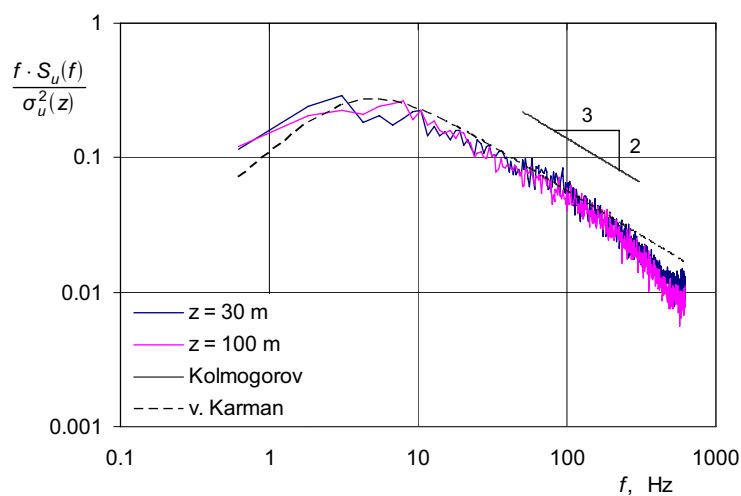
Slika 5.35: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije (mjerilo 1:250, $z = 100$ m)

Međutim, registrirano je smanjenje energije u području viših frekvencija kod hrapavijih podloga. Kao posljedica povećanja hrapavosti podloge istovremeno dolazi do porasta intenziteta turbulencije i smanjenja integralne duljinske mjere turbulencije. Gubici energije u području viših frekvencija kod hrapavijih podloga bivaju nadomješteni u niskofrekventnom području, tj. turbulentna struktura nastala strujanjem iznad hrapavije podloge sadrži u niskofrekventnom području više energije u odnosu na manje hrapave podloge. Sličnu tendenciju dokumentirali su Iyengar [55], Sitheeq i dr. [56], Wittwer i dr. [57], Taylor [58] i Corke i dr. [59].

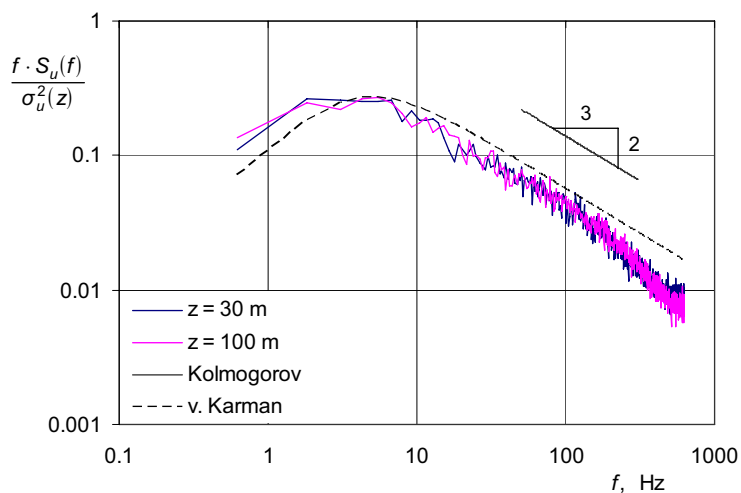
Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije u ovisnosti o udaljenosti od podloge je prikazana na slikama 5.36, 5.37 i 5.38. U svim konfiguracijama se pokazalo da su izgled profila i iznosi kinetičke energije turbulencije neovisni o udaljenosti od podloge, prikazano na primjeru sva tri tipa graničnog sloja ($\alpha = 0.17, 0.21$ i 0.35) u mjerilu 1:250 na slikama 5.36, 5.37 i 5.38. Ista tendencija ponavlja se i u mjerilima 1:500 i 1:333.



Slika 5.36: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije ($\alpha = 0.17$, mjerilo 1:250, $z = 30$ i 100 m)



Slika 5.37: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije ($\alpha = 0.21$, mjerilo 1:250, $z = 30$ i 100 m)



Slika 5.38: Spektralna raspodjela kinetičke energije turbulencije ($\alpha = 0.35$, mjerilo 1:250, $z = 30$ i 100 m)

6. Zaključak

U zračnom tunelu su istražene razlike u strukturi modela atmosferskog graničnog sloja u mjerilima 1:500, 1:333 i 1:250. Modelirana su tri tipa atmosferskog graničnog sloja, koja su karakterizirana eksponentom zakona potencije α , a nastaju strujanjem zraka iznad:

- polja s rijetko raspoređenim i niskim raslinjem ($\alpha = 0.17$),
- predgrađa s niskim obiteljskim kućama i niskim stablima ($\alpha = 0.21$),
- centra grada s visokim i gusto raspoređenim zgradama ($\alpha = 0.35$).

Također su analizirane promjene strukture strujanja u svakom pojedinom mjerilu za različite tipove atmosferskog graničnog sloja.

Modeli atmosferskog graničnog sloja generirani su Counihanovom metodom, jer se korištenjem navedene metode rezultati dobiveni u zračnom tunelu najbolje podudaraju s rezultatima mjerenja u prirodi. Budući da se kod primjene Counihanove metode ne mogu unaprijed odrediti potrebni parametri (visina i oblik ispupčenja barijere, dimenzije generatora vrtloga, te visina i gustoća podne hrapavosti) koji osiguravaju unaprijed zadani model atmosferskog graničnog sloja, generiran je veći broj modela. Detaljno su analizirani samo oni koji zadovoljavaju postavljene parametre ($\alpha = 0.17, 0.21, 0.35$ u mjerilima 1:500, 1:333, 1:250). Ostali modeli atmosferskog graničnog sloja predstavljaju podlogu za kasnija modelska ispitivanja.

Struktura modela atmosferskog graničnog sloja je definirana na temelju mjerenja brzine metodom užarene žice. Pritom su određene vrijednosti sljedećih parametara, koji karakteriziraju strujanje unutar graničnog sloja:

- osrednjene vrijednosti komponenti brzine strujanja \bar{u} , \bar{v} i \bar{w} ,
- intenziteti turbulencije I_u , I_v i I_w ,
- tangencijalne komponente Reynoldsovih naprezanja $-\overline{\rho u'v'}$, $-\overline{\rho u'w'}$ i $-\overline{\rho v'w'}$,
- integralne duljinske mjere turbulencije $L_{u,x}$, $L_{u,y}$ i $L_{u,z}$,

- frekvencijska raspodjela kinetičke energije turbulentnih pulzacija u x smjeru S_u .

U okviru analize rezultata mjerenja razmatrani su samo najvažniji parametri $(\bar{u}, I_u, I_v, I_w, -\overline{\rho u'w'}, L_{u,x}, S_u)$.

Na temelju provedenih istraživanja moguće je potvrditi sljedeće poznate činjenice:

- S povećanjem visine i gustoće raspodjele elemenata podne hrapavosti smanjuju se osrednjene vrijednosti brzine \bar{u} , povećava se iznos intenziteta turbulencije I_u, I_v, I_w i Reynoldsovog tangencijalnog naprezanja $-\overline{\rho u'w'}$. Kod hrapavijih podloga se javlja tendencija pojave područja s konstantnim vrijednostima Reynoldsovog naprezanja $-\overline{\rho u'w'}$ u blizini podloge. Ova je tendencija registrirana i u prirodi, prema ESDU [41]. Ovaj je pojas znatno veći kod atmosferskog graničnog sloja koji nastaje strujanjem zraka iznad gusto naseljene površine s visokim zgradama. Integralna duljinska mjera turbulencije $L_{u,x}$ je na određenoj visini u donjem dijelu graničnog sloja (do visine približno 80 m) manja ukoliko je podloga hrapavija.
- Udaljavanjem od podloge utjecaj podne hrapavosti opada, što se očituje smanjenjem razlika vrijednosti Reynoldsovog naprezanja $-\overline{\rho u'w'}$ za različite tipove graničnog sloja u istom mjerilu.
- Odnosi intenziteta turbulencije I_v/I_u i I_w/I_u u svim konfiguracijama približno odgovaraju rezultatima mjerenja u prirodi ($I_u : I_v : I_w = 1 : 0.75 : 0.5$), što je potvrda sličnosti strukture turbulencije kod modela i prototipa.
- U zračnom tunelu nije moguće točno generirati integralne duljinske mjere turbulencije $L_{u,x}$. Dva su bitna faktora koja onemogućavaju precizno modeliranje dimenzija vrtloga. Raspon dimenzija između najmanjih i najvećih vrtloga je u prirodi bitno veći u odnosu na zračni tunel, a gradijent brzine $\partial\bar{u}/\partial z$ u blizini podloge je u zračnom tunelu značajno veći u usporedbi s gradijentom brzine u prirodi.
- Izgled profila spektralne raspodjele energije turbulentnih pulzacija S_u i njihovi bezdimenzijski iznosi neovisni su o udaljenosti od podloge i vrlo dobro se podudaraju s teoretskim modelima Kolmogorova i von Karmana.

O utjecaju mjerila na strukturu modela atmosferskog graničnog sloja na temelju provedenih istraživanja moguće je zaključiti sljedeće:

- Kod modeliranja određenog tipa atmosferskog graničnog sloja u tri različita mjerila nije bilo moguće postići potpuno istu strukturu podne hrapavosti. U donjem dijelu modela atmosferskog graničnog sloja (do 100 m) razlike vrijednosti osrednjenih brzina \bar{u} ovisno o mjerilu su male i mogu se zanemariti. Vrijednosti intenziteta turbulencije I_u , I_v , I_w i Reynoldsovog tangencijalnog naprezanja $-\overline{\rho u'w'}$ za isti tip graničnog sloja su veće u mjerilu u kojem je podloga hrapavija.
- U gornjem dijelu graničnog sloja očit je utjecaj mjerila. S povećanjem mjerila dolazi do smanjenja vrijednosti brzine \bar{u} zbog utjecaja sekundarnog graničnog sloja, što je najizraženije u mjerilu 1:250. U mjerilu 1:250 intenzitet turbulencije I_u , I_v , I_w u srednjem i gornjem dijelu graničnog sloja (od 50 m naviše) brže opada s povećanjem visine u odnosu na mjerila 1:333 i 1:500. Ovaj je fenomen izraženiji kod graničnih slojeva koji nastaju strujanjem iznad hrapavije podloge ($\alpha = 0.21$ i 0.35). U skladu s navedenim su iznosi Reynoldsovog naprezanja $-\overline{\rho u'w'}$ u gornjem dijelu modela atmosferskog graničnog sloja najmanji u mjerilu 1:250.
- Integralna duljinska mjera turbulencije $L_{u,x}$ se na određenoj visini unutar graničnog sloja povećava sa smanjenjem mjerila (veća u mjerilu 1:500 u odnosu na mjerila 1:333 i 1:250).
- Razlike u profilima spektara za isti tip graničnog sloja u različitim mjerilima su male. Može se zaključiti da pri točnom modeliranju ostalih parametara strukture turbulencije izbor mjerila nema utjecaja na izgled profila spektra kinetičke energije turbulencije, ako se zanemari raniji početak zone disipacije u mjerilu 1:333 za granične slojeve $\alpha = 0.17$ i $\alpha = 0.21$. Za granični sloj karakteriziran velikom hrapavosti podloge ($\alpha = 0.35$) spektri se vrlo dobro podudaraju u sva tri mjerila.

Originalni znanstveni doprinos rada

Eksperimentalnim metodama je u zračnom tunelu sustavno istražen utjecaj mjerila na strukturu modeliranog atmosferskog graničnog sloja. Potvrđena je

osnovna hipoteza rada da mjerilo simulacije ima utjecaja na strukturu modela atmosferskog graničnog sloja. U gornjem dijelu graničnog sloja s povećanjem mjerila dolazi do smanjenja osrednjenih vrijednosti brzine zbog utjecaja sekundarnog graničnog sloja, a intenzitet turbulencije brže opada s povećanjem visine. Iznosi Reynoldsovog naprezanja u gornjem dijelu modela atmosferskog graničnog sloja se smanjuju s povećanjem mjerila. U donjem dijelu graničnog sloja razlike vremenski osrednjenih struktura strujanja u različitim mjerilima su relativno male. Vrijednosti intenziteta turbulencije i Reynoldsovog naprezanja su veće u mjerilu u kojem je podloga hrapavija. Integralna duljinska mjera turbulencije se na određenoj visini unutar graničnog sloja povećava sa smanjenjem mjerila. Razlike u profilima spektara energije turbulentnih pulzacija uslijed promjene mjerila se mogu zanemariti.

Literatura

1. COUNIHAN, J.: The structure and the wind tunnel simulation of rural and urban adiabatic boundary layers, Symp. External Flows, University of Bristol, 07/ 1972.
2. COUNIHAN, J.: A method of simulating a neutral atmospheric boundary layer in a wind tunnel, AGARD Conf. Proc., 43, 1969.
3. COUNIHAN, J.: Simulation of an adiabatic urban boundary layer in a wind tunnel, Atmospheric Environment, 7, S. 673-689, 1973.
4. COUNIHAN, J.: An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel, Atmospheric Environment, 3, S. 197-214, 1969.
5. COUNIHAN, J.: Wind tunnel determination of the roughness length as a function of the fetch and the roughness density of three-dimensional roughness elements, Atmospheric Environment, 5, S. 637-642, 1971.
6. KOZMAR, H.: Modeliranje atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu, magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2000.
7. ROBINS, A.G.: The development and structure of simulated neutrally stable atmospheric boundary layers, Journal of Industrial Aerodynamics, 4, S. 71-100, 1979.
8. IYENGAR, A.K.S., FARELL, C.: Experimental issues in atmospheric boundary layer simulations: roughness length and integral length scale determination, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89, S. 1059-1080, 2001.
9. FARELL, C., IYENGAR, A.K.S.: Experiments on the wind tunnel simulation of atmospheric boundary layers, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 79, S. 11-35, 1999.
10. COOK, N.J.: On simulating the lower third of the urban adiabatic boundary layer in a wind tunnel, Atmospheric Environment, 7, S. 691-705, 1973.
11. COOK, N.J.: Wind-tunnel simulation of the adiabatic atmospheric boundary layer by roughness, barrier and mixing-device methods, Journal of Industrial Aerodynamics, 3, S. 157-176, 1978.

12. SCHON, J.P., MERY, P.: A preliminary study of the simulation of neutral atmospheric boundary layer using air injection in a wind tunnel, *Atmospheric Environment*, 5, S. 299-311, 1971.
13. NAGIB, H.M., MORKOVIN, M.V., YUNG, J.T., TAN-ATICHAT, J.: On modeling of atmospheric surface layers by the counter-jet technique, *AIAA Journal*, 14, S. 185-190, 1976.
14. TEUNISSEN, H.W.: Simulation of the planetary boundary layer in a multiple-jet wind tunnel, *Atmospheric Environment*, 9, S. 145-174, 1975.
15. MELBOURNE, W.H.: Comparison of pressure measurements made on a large isolated building in full and model scale, *Proc. Third Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures*, Tokyo, S. 253-262, 1971.
16. STANDEN, N.M.: A spire array for generating thick turbulent shear layers for natural wind simulation in wind tunnels, T.R. LTR-LA-94, Nat. Aeronaut. Establishment, Ottawa, 1972.
17. STANDEN, N.M., DALGLIESH, W.A., TEMPLIN, R.J.: A wind tunnel and full-scale study of turbulent wind pressures on a tall building, *Proc. Third Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures*, Tokyo, S. 199-209, 1971.
18. ARMITT, J.: The simulation of the atmospheric boundary layer in a wind tunnel, Central Electricity Research Laboratories, Lab. Note No. RD/L/N83/66, 1966.
19. LLOYD, A.R.: The generation of shear flow in a wind tunnel, *Q. Jl. R. Met. Soc.*, 93, S. 79-96, 1967.
20. TEMPLIN, G.: Interim progress note on Simulation of Earths surface winds by artificially thickened wind tunnel boundary layers, NRC Canada LTR-LA-22, 1969.
21. WIER, M., RÖMER, L.: Experimentelle Untersuchung von stabil und instabil geschichteten turbulenten Plattengrenzschichten mit Bodenrauigkeit, *Z. Flugwiss. Weltraumforsch.*, 11, S. 78-86, 1987.
22. TIELEMAN, H.W., REINHOLD, T.A.: On the wind-tunnel simulation of the atmospheric surface layer for the study of wind loads on low-rise buildings, *Journal of Industrial Aerodynamics*, 3, S. 21-38, 1978.

23. SUNDARAM, T.R., LUDWIG, G.R., SKINNER, G.T.: Modeling of the Turbulence Structure of the Atmospheric Surface Layer, AIAA Journal, Vol. 10, No. 6, 1972.
24. COCKRELL, D.J., LEE, B.E.: Methods and consequences of atmospheric boundary layer simulation, AGARD Conf. Proc., 48, 1969.
25. SCHUBAUER, G.B., SPANDENBERG, W.G.: Forced mixing in boundary layers, Journal of Fluid Mechanics, 8, S. 10-32, 1960.
26. SIMIU, E., SCANLAN, R.H.: Wind effects on structures, John Wiley & Sons, 1996.
27. SCHLICHTING, H., GERSTEN K.: Grenzschicht-Theorie, Springer Verlag, 1996.
28. COUNIHAN, J.: Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880-1972, Atmospheric Environment, 9, S. 871-905, 1975.
29. GARRATT, J.R.: The atmospheric boundary layer, Cambridge University Press, 1992.
30. DYRBYE, C., HANSEN, S.: Wind loads on structures, John Wiley & Sons, 1997.
31. ESDU: Characteristics of wind speed in the lower layers of the atmosphere near the ground: strong winds (neutral atmosphere), Engineering Sciences Data Unit, 85020, 1985.
32. ESDU: Characteristics of wind speed in the lower layers of the atmosphere near the ground: strong winds (neutral atmosphere), 72026, 1972.
33. WTG: Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik, Windtechnologische Gesellschaft WTG e.V., 1994.
34. THUILLER, R.H., LAPPE, U.O.: Wind and Temperature Profile Characteristics from Observations on a 1400 ft Tower, Journal of Applied Meteorology, 3, S. 299-306, 1964.
35. BUSINGER, J.A., WYNGAARD, J.C., BRADLEY, E.F: Flux-profile relationship in the atmospheric surface layer, Journal of Atmospheric Science, 28, S. 181-189, 1971.

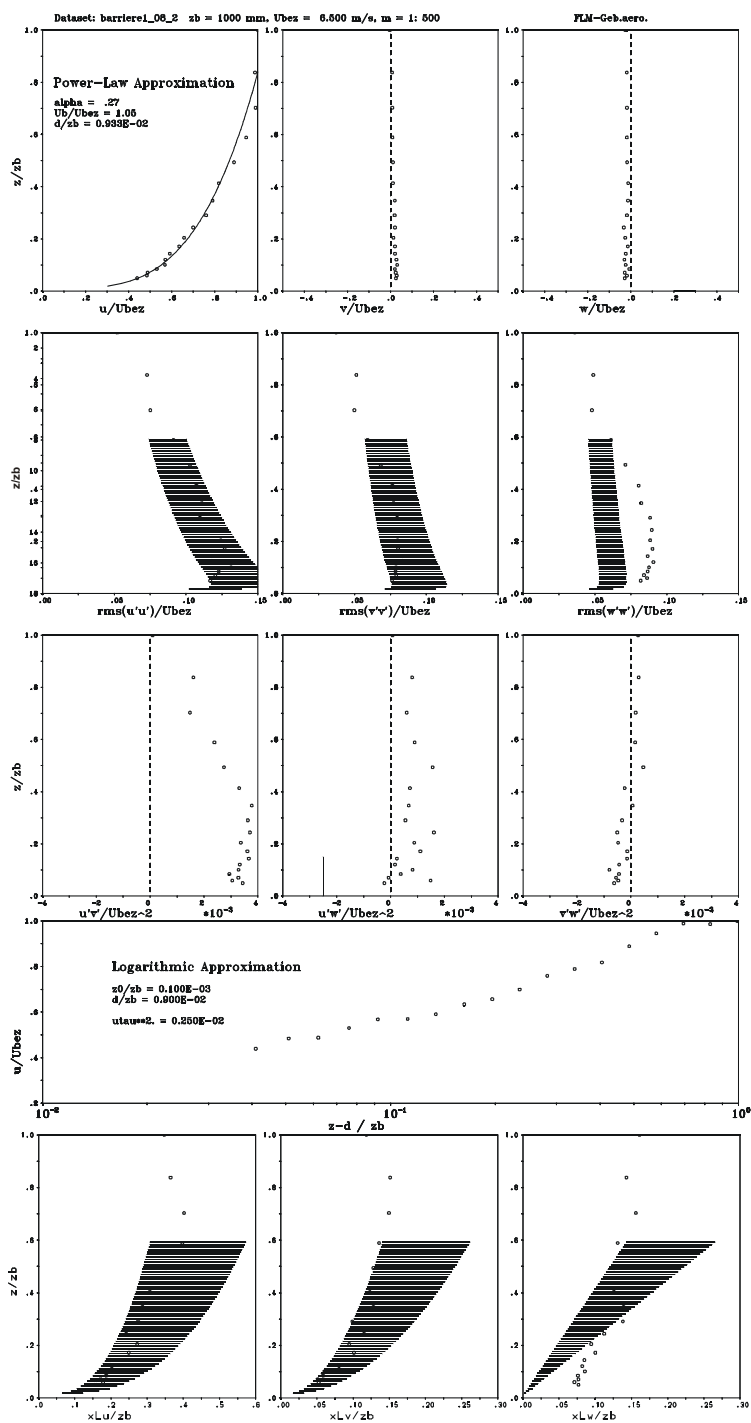
36. PANOFSKY, H.A.: Summary paper for session 1, Wind structure, Proc. Fourth Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, Heathrow, S. 3-6, 1975.
37. PERNPEINTNER, A.: Predavanja iz predmeta "Aerodynamik der Bauwerke", Lehrstuhl für Fluidmechanik, Fakultät für Maschinenwesen, TU-München, 1998.
38. LANDAU, L.D., LIFSHITZ, E.M.: Fluid Mechanics, Pergamon Press, 1987.
39. DAVENPORT, A.G.: The buffeting of large superficial structures by atmospheric turbulence, v. Karman Institute for Fluid Dynamics, Lectures Series 45, Wind Effects on Buildings and Structures, 1972.
40. PRÖPPER, H.: Zur aerodynamischen Belastung großer Kühltürme, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen, 1977.
41. ESDU: Characteristics of atmospheric turbulence near the ground, Part II: single point data for strong winds (neutral atmosphere), Engineering Sciences Data Unit, 74031, 1975.
42. PLATE, E.J.: Engineering meteorology, Elsevier Scientific Publishing Company, 1982.
43. WANNINGER, R.: Messung, Auswertung und Darstellung der Turbulenzstruktur in einer modellierten atmosphärischen Grenzschichtströmung, neobjavljeno, 1992.
44. TRUCKENBRODT, E.: Strömungsmechanik, Springer-Verlag, 1968.
45. SOCKEL, H.: Aerodynamik der Bauwerke, Vieweg & Sohn, 1984.
46. PASQUILL, F.: Wind structure in the atmospheric boundary, Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., A269, S. 439-456, 1971.
47. DUCHENE-MARULLAZ, P.: Effect of high roughness on the characteristics of turbulence in cases of strong winds, Proc. Of the 5th Int. Conf. on Wind Eng., Fort Collins, 1, S. 179-194, 1979.
48. COOK, N.J.: Determination of the model scale factor in wind-tunnel simulations of the adiabatic atmospheric boundary layer, Journal of Industrial Aerodynamics, 2, S. 311-321, 1977/1978.
49. WOLF-HEINRICH, H.: Aerodynamik der stumpfen Körper, Vieweg&Sohn, 2002.

50. ILG, L.: Boundary, Fortran-Quellcode zum Programm Boundary, Lehrstuhl für Fluidmechanik, Fakultät für Maschinenwesen, TU-München, 1991.
51. ESDU: Integral length scales of turbulence over flat terrain with roughness changes, 86035, 1988.
52. DAVENPORT, A.G.: The relationship of wind structure to wind loading, Proc. Symp. Wind Effects on Buildings and Structures, Teddington, 1963.
53. DAVENPORT, A.G.: The dependence of wind loads on meteorological parameters, Proc. Symp. Wind Effects on Buildings and Structures, Ottawa 1967.
54. PANOFSKY, H.A.: The structure of atmospheric shear flows. Paper 1. A.G.A.R.D., Conf. Proc. No. 48, 1969.
55. IYENGAR, A.K.S.: Effects of turbulence and its scales on the pressure distributions on three-dimensional square prisms, Ph.D. Thesis, University of Minnesota, 1997.
56. SITHEEQ, M.M., IYENGAR, A.K.S., FARELL, C.: Effect of turbulence and its scales on the pressure field on the surface of a three-dimensional square prism, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, S. 69-71, S. 461-471, 1997.
57. WITTEWER, A.R., DE BORTOLI, M.E., NATALINI, M.B.: The importance of the analysis of velocity fluctuations in a simulation of atmospheric boundary layer in wind tunnel, neobjavljeno, Facultad de Ingenieria, Universidad Nacional del Nordeste
58. TAYLOR, T.J.: Wind pressures on a hemispherical dome, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 40, S. 199-213, 1991.
59. CORKE, T.C., NAGIB, H.M., TAN-ATICHAT, J.: Flow near a building model in a family of surface layers, Journal of Industrial Aerodynamics, 5, S. 139-158, 1979.

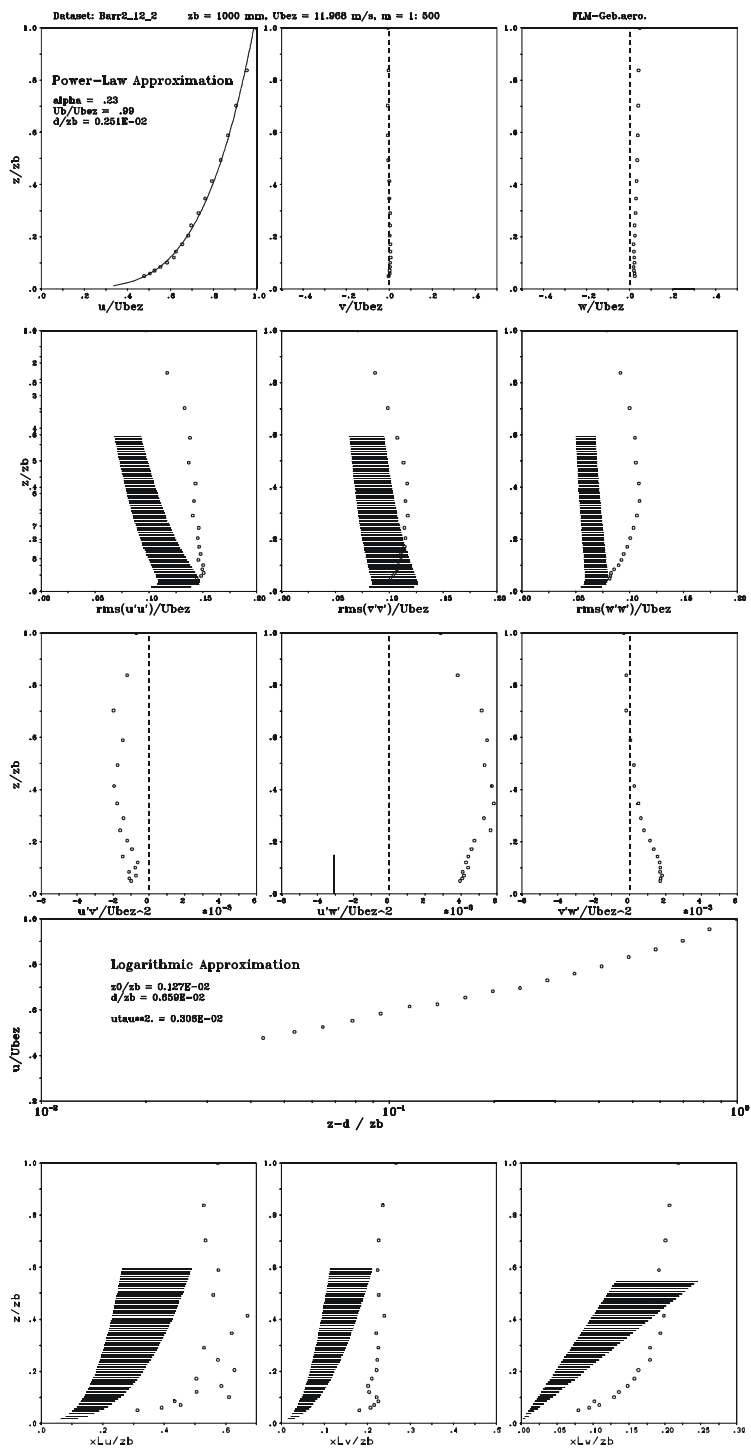
Prilog A

- Generirani modeli atmosferskog graničnog sloja -

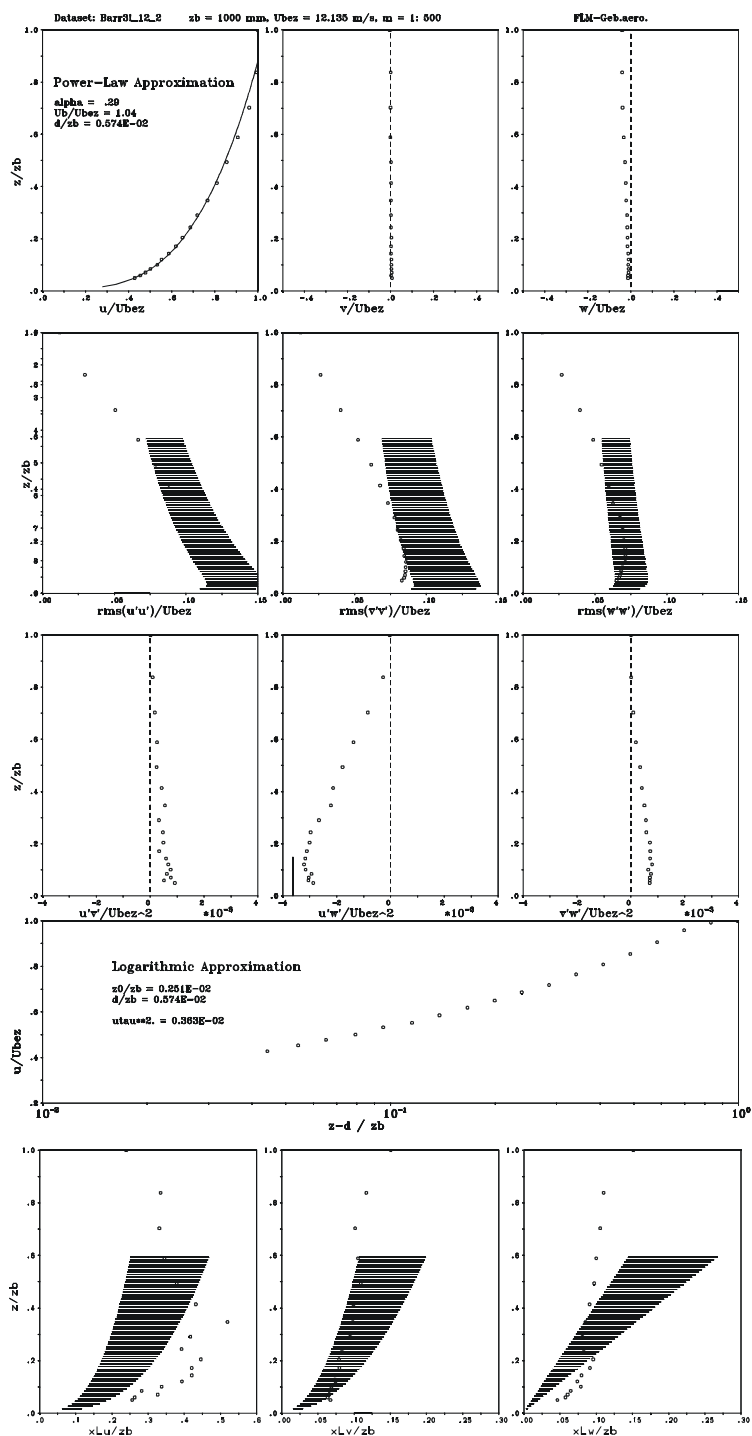
1. red: Profili osrednjenih vrijednosti brzine u x, y i z smjeru normirani s \bar{u}_δ
2. red: Profili intenziteta turbulencije u x, y i z smjeru normirani s \bar{u}_δ
3. red: Profili Reynoldsovog tangencijalnog naprezanja $-\rho\overline{u'v'}$, $-\rho\overline{u'w'}$ i $-\rho\overline{v'w'}$ normirani s \bar{u}_δ^2
4. red: Profil osrednjenih vrijednosti brzine u x smjeru normirani s \bar{u}_δ
(logaritamsko mjerilo)
5. red: Integralne duljinske mjere turbulencije x, y i z smjeru normirane s \bar{u}_δ



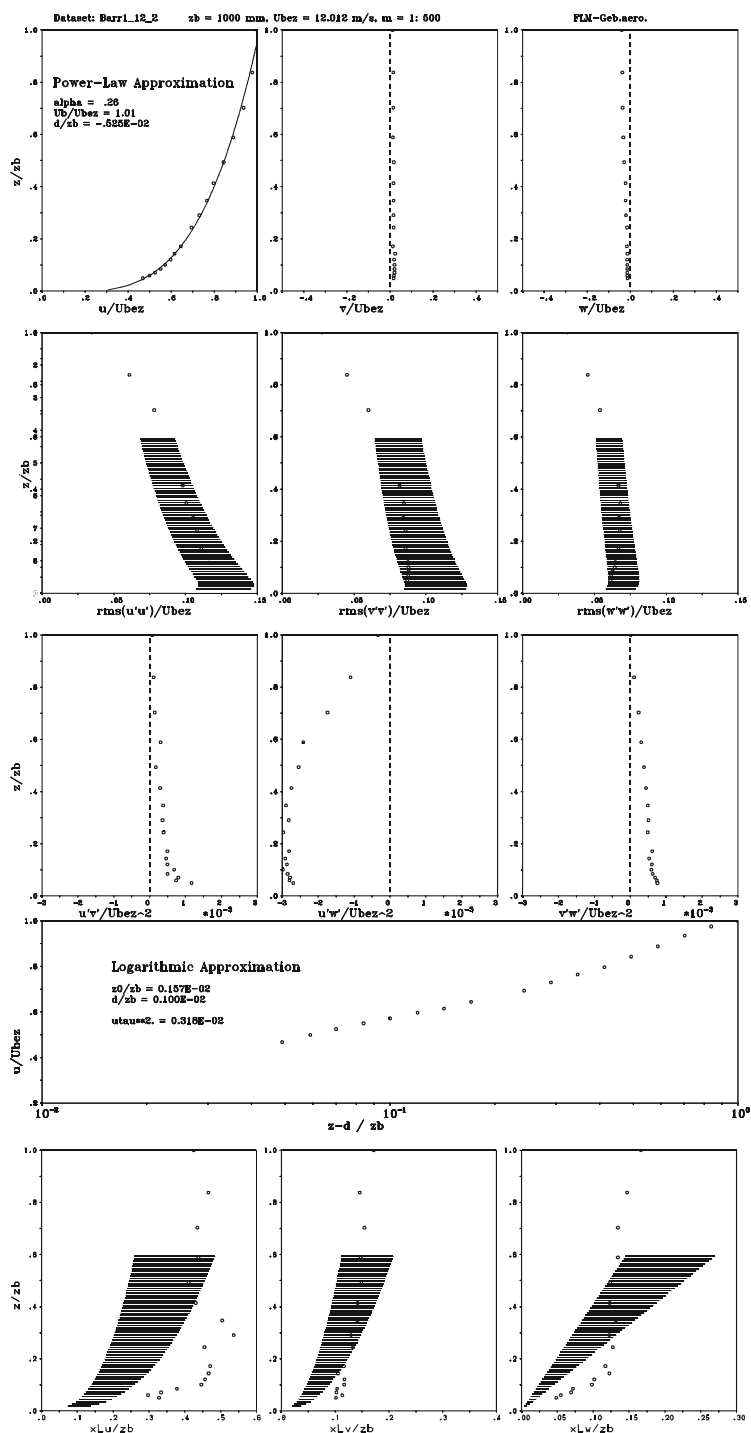
Slika A.1: Mjerilo 1:500, barijera 1, podna hrapavost R1



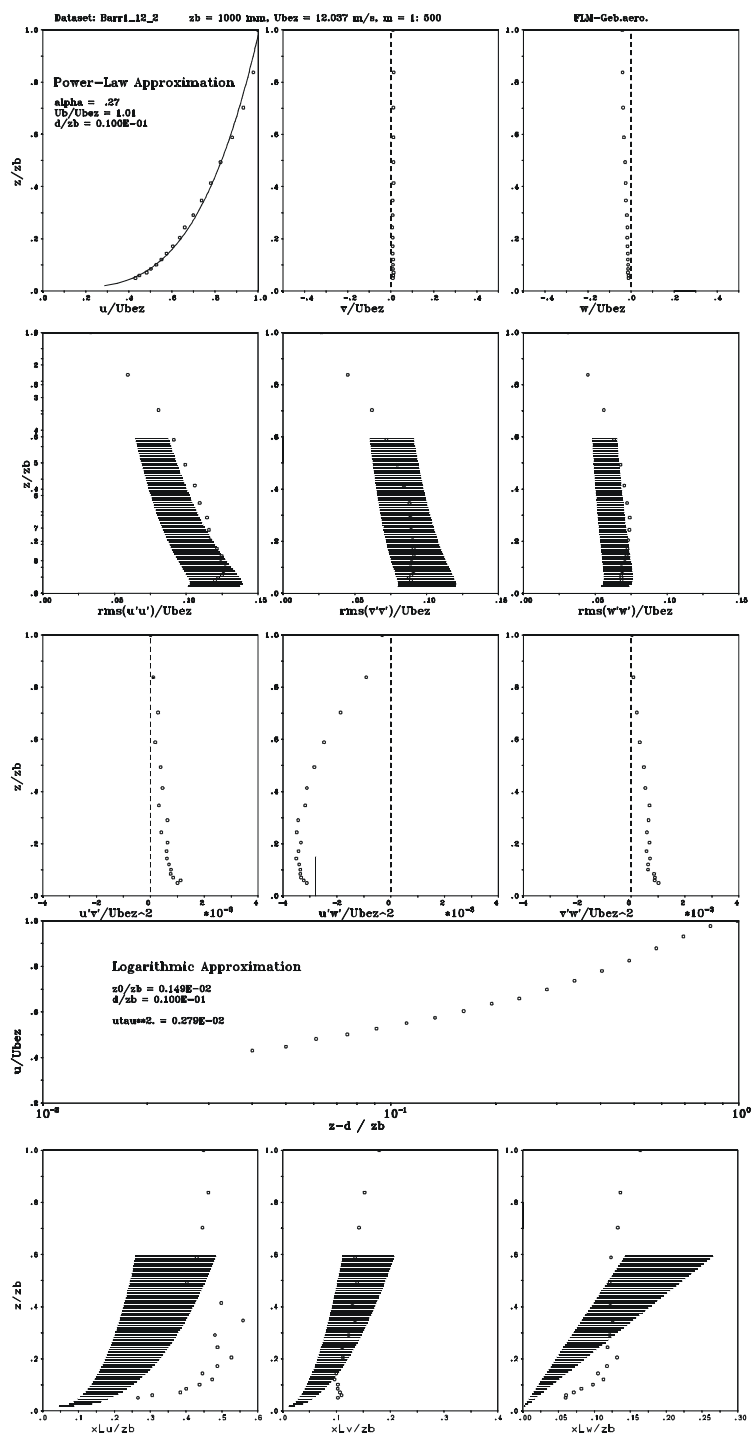
Slika A.2: Mjerilo 1:500, barijera 2, podna hrapavost R1



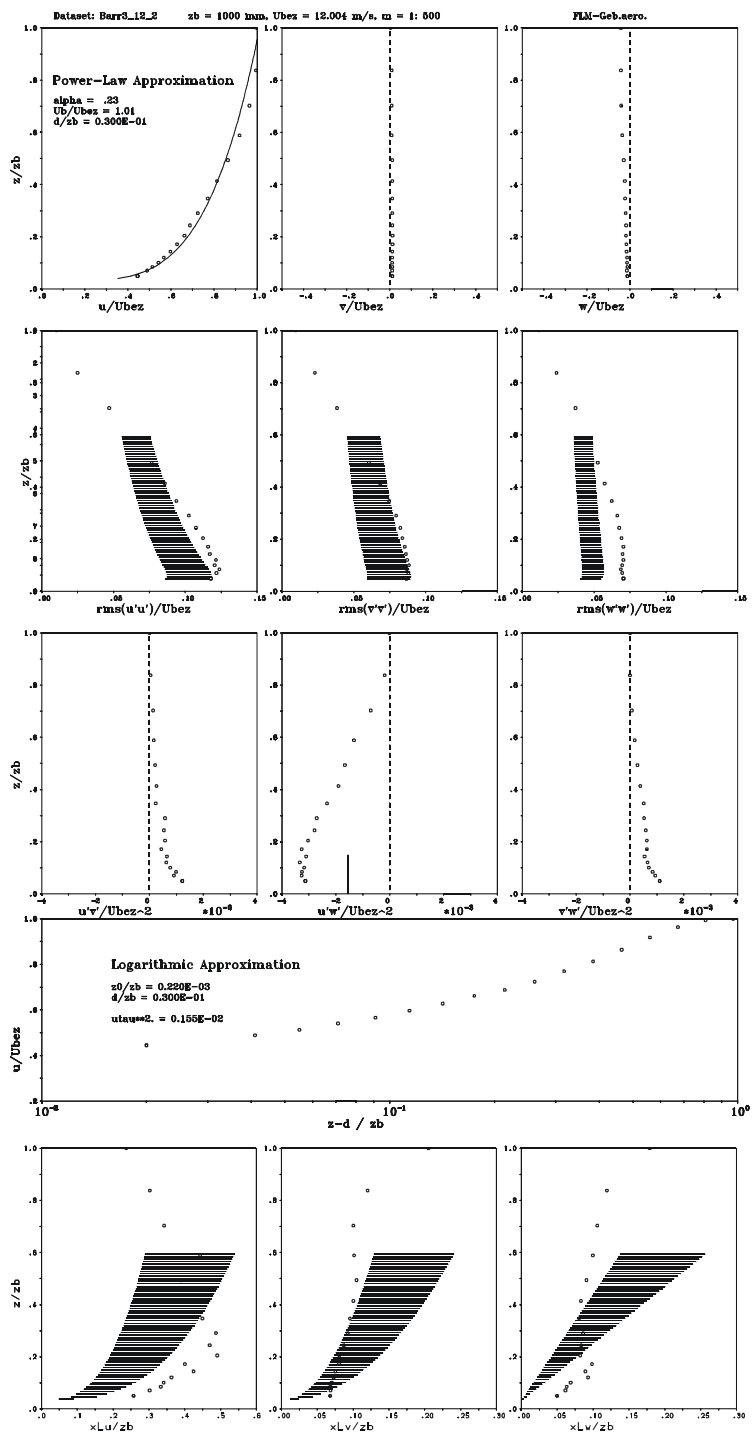
Slika A.3: Mjerilo 1:500, barijera 3, podna hrapavost R1



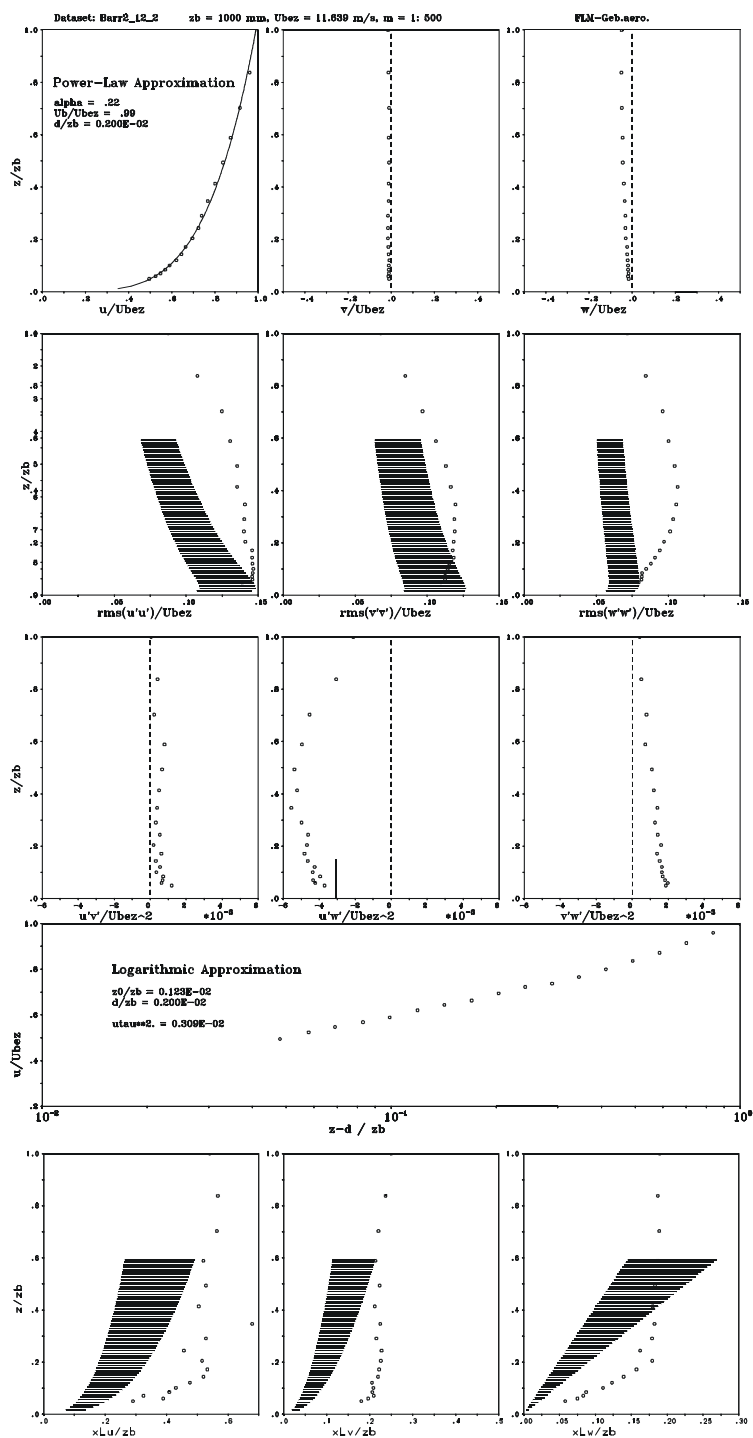
Slika A.4: Mjerilo 1:500, barijera 1, podna hrapavost R2



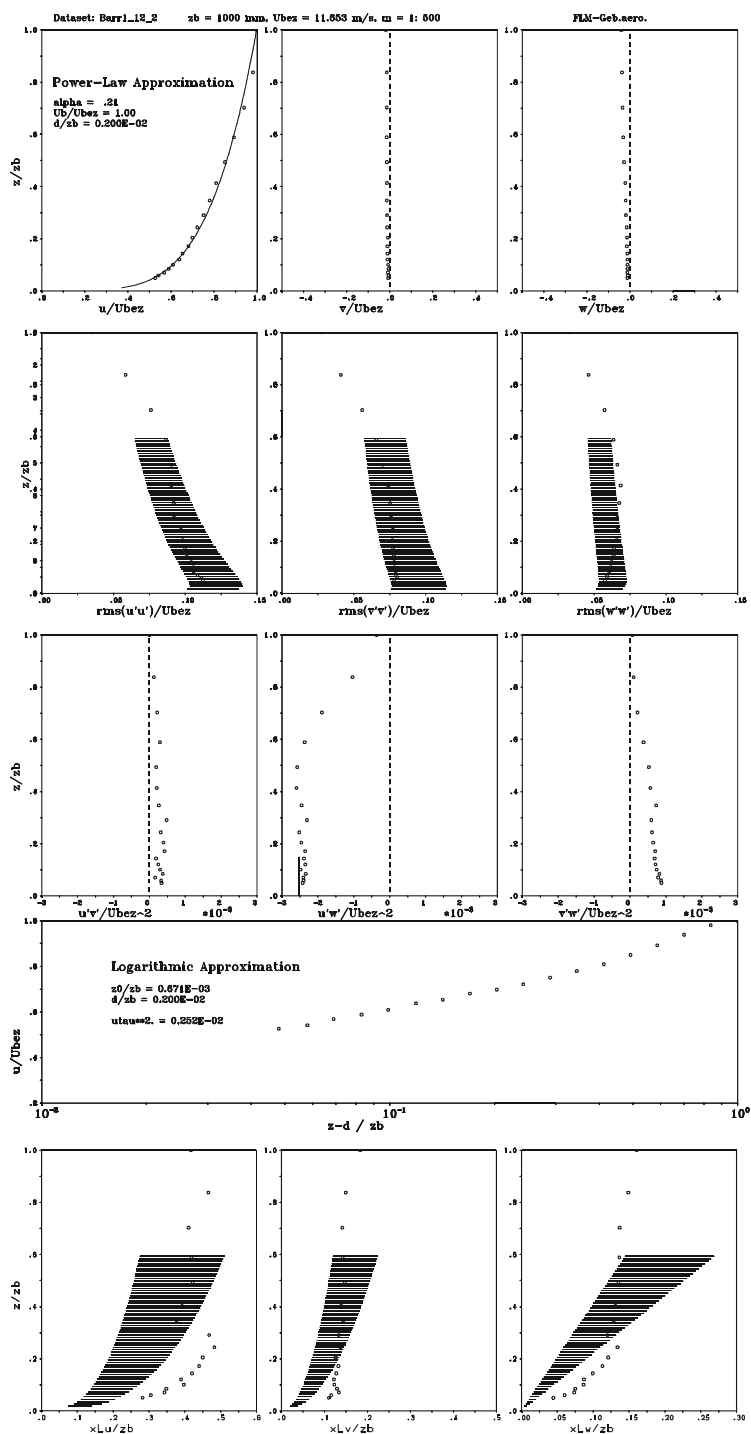
Slika A.5: Mjerilo 1:500, barijera 1, podna hrapavost R3



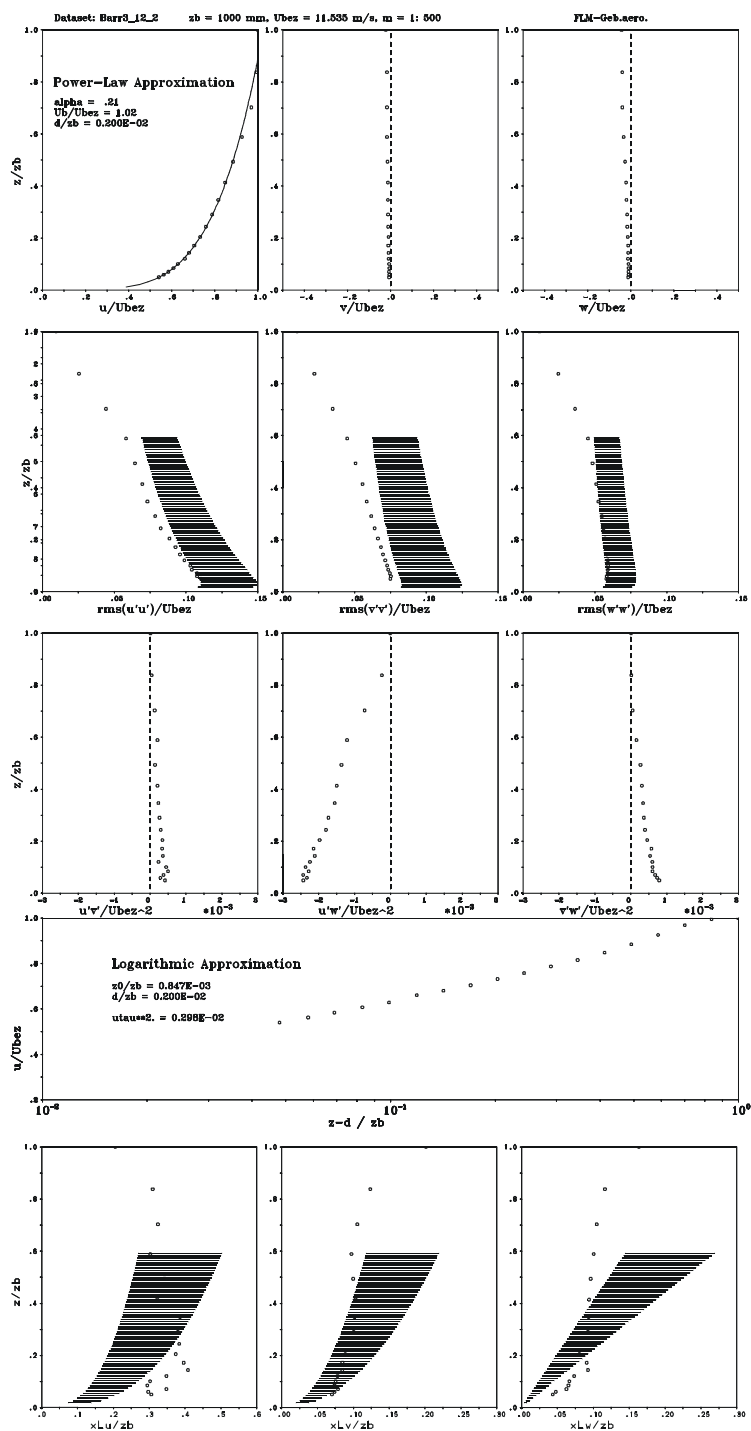
Slika A.6: Mjerilo 1:500, barijera 3, podna hrapavost R3



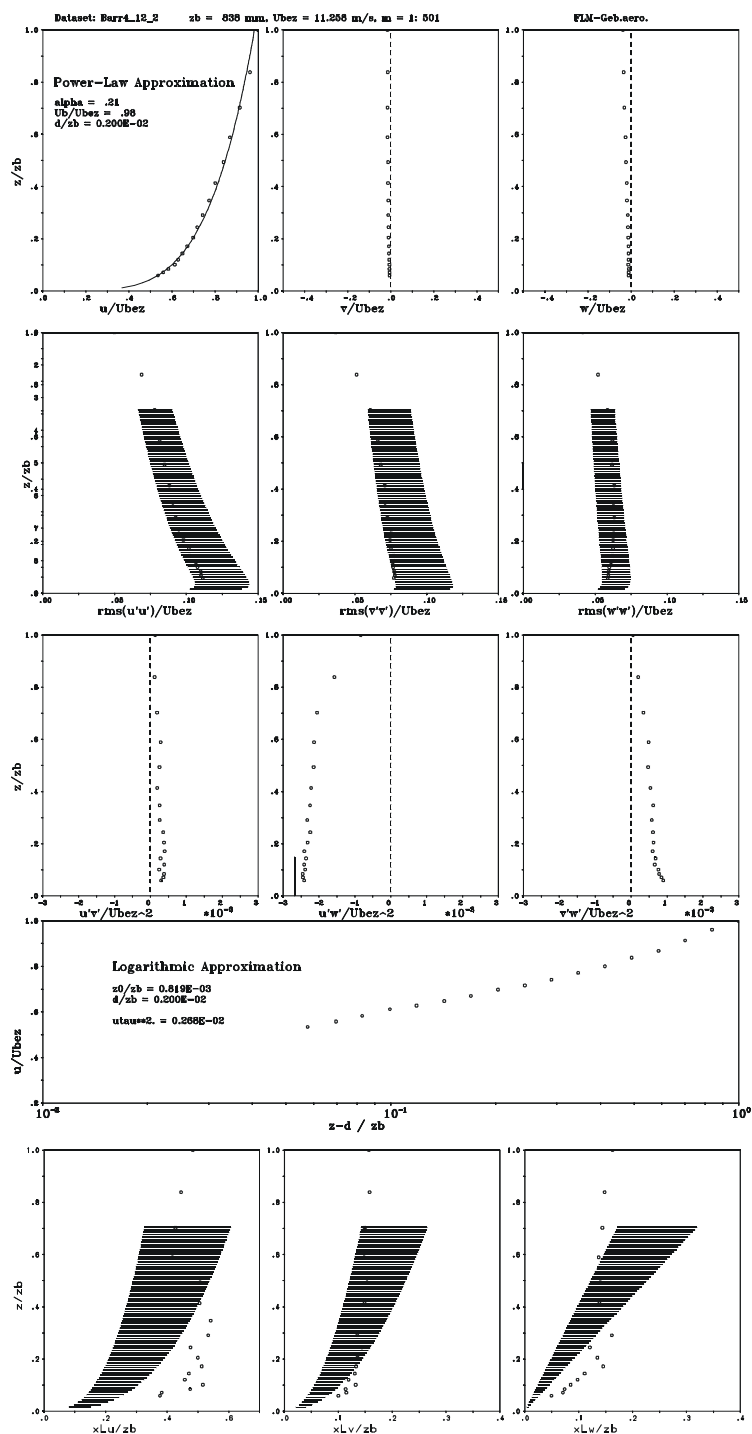
Slika A.7: Mjerilo 1:500, barijera 2, podna hrapavost R3



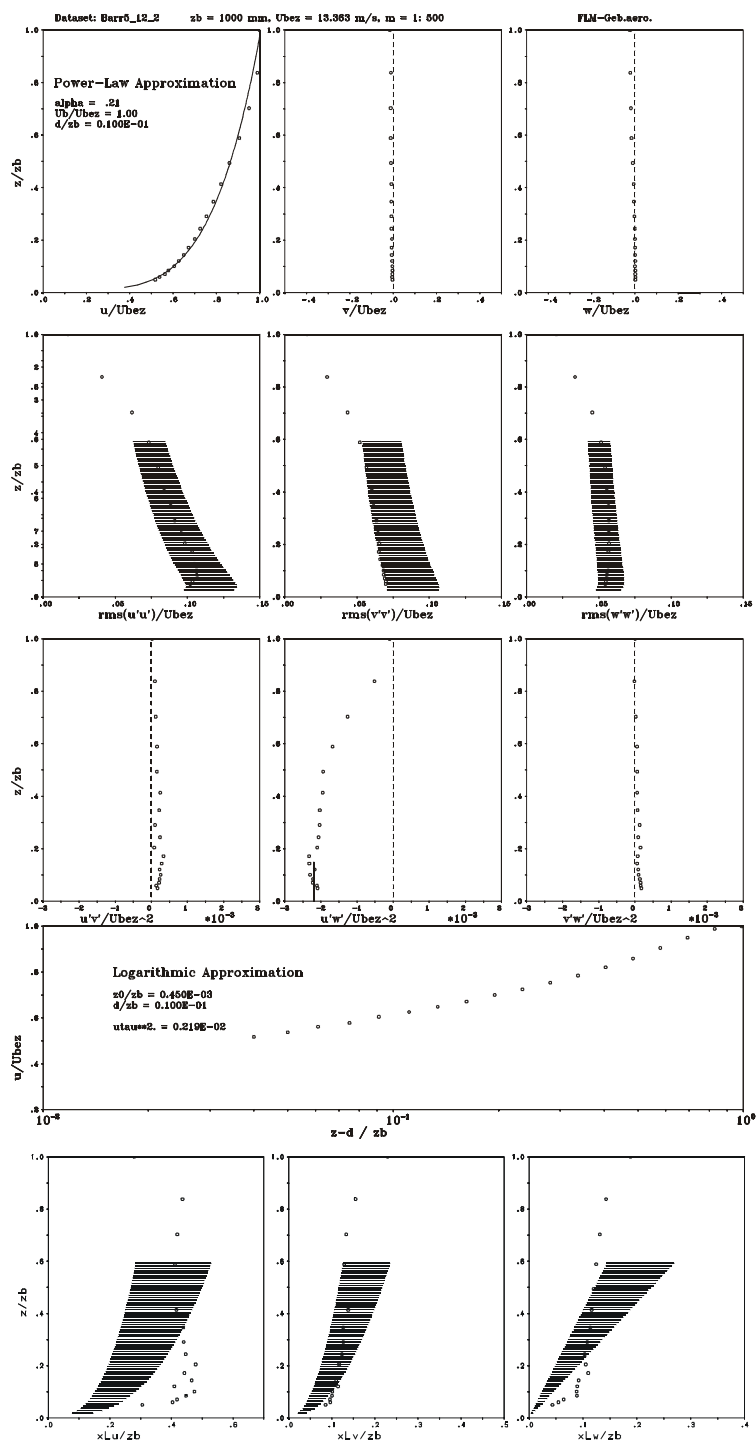
Slika A.8: Mjerilo 1:500, barijera 1, podna hrapavost R4



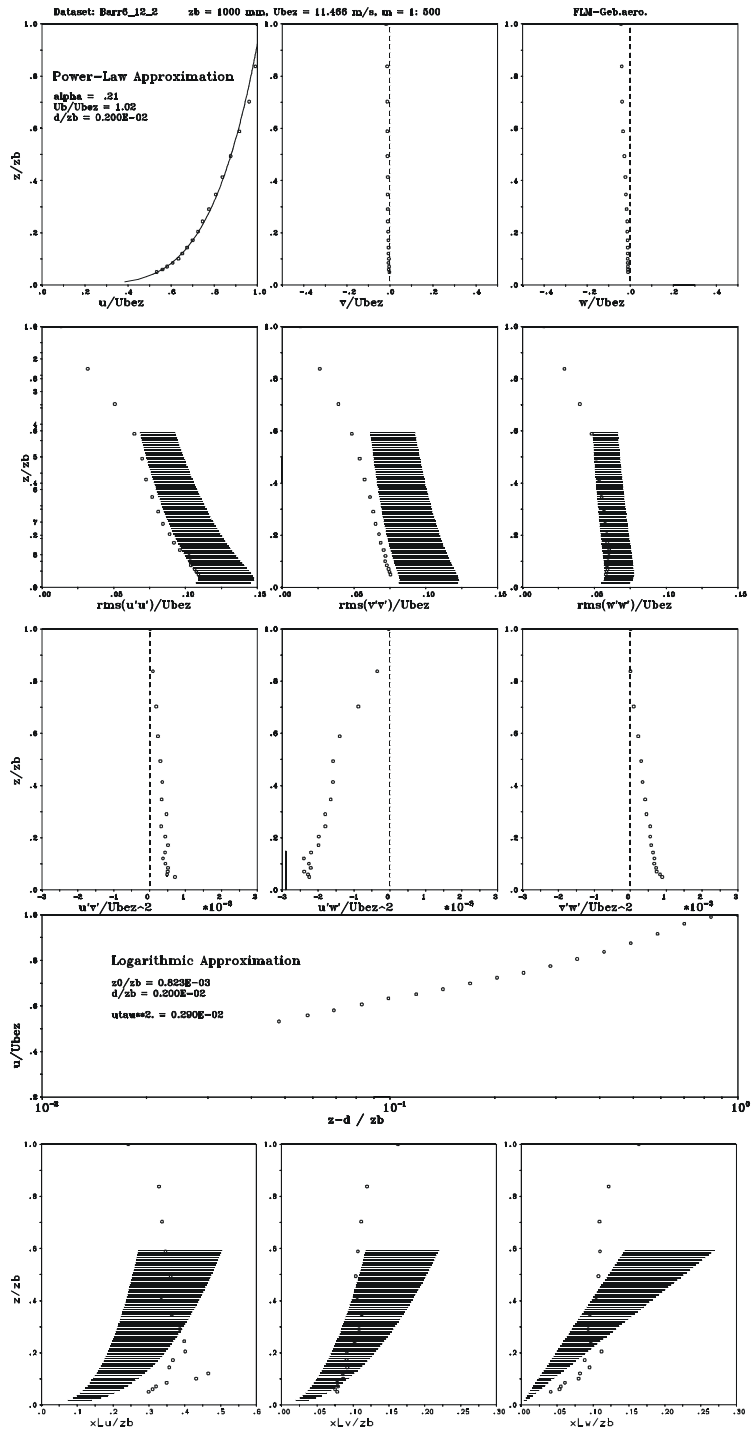
Slika A.9: Mjerilo 1:500, barijera 3, podna hrapavost R4



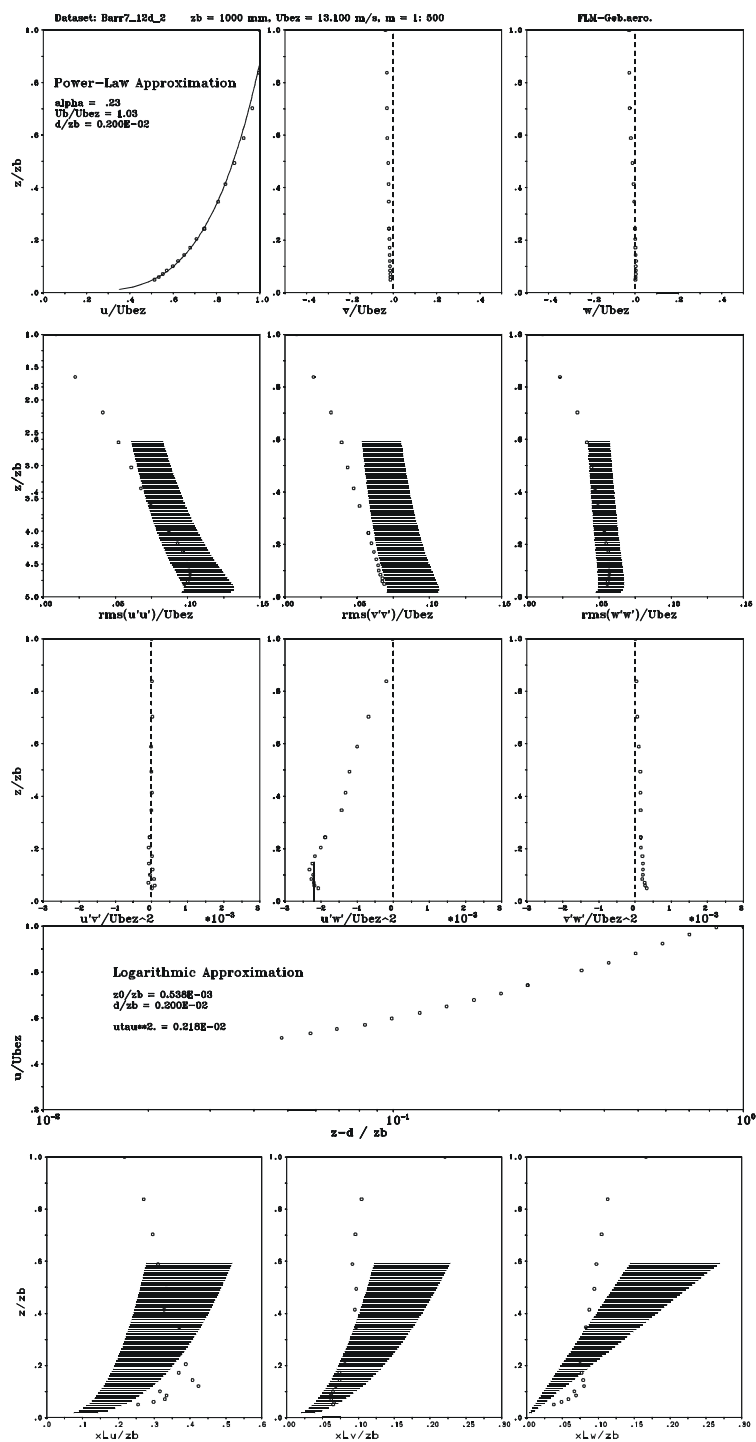
Slika A.10: Mjerilo 1:500, barijera 4, podna hrapavost R4



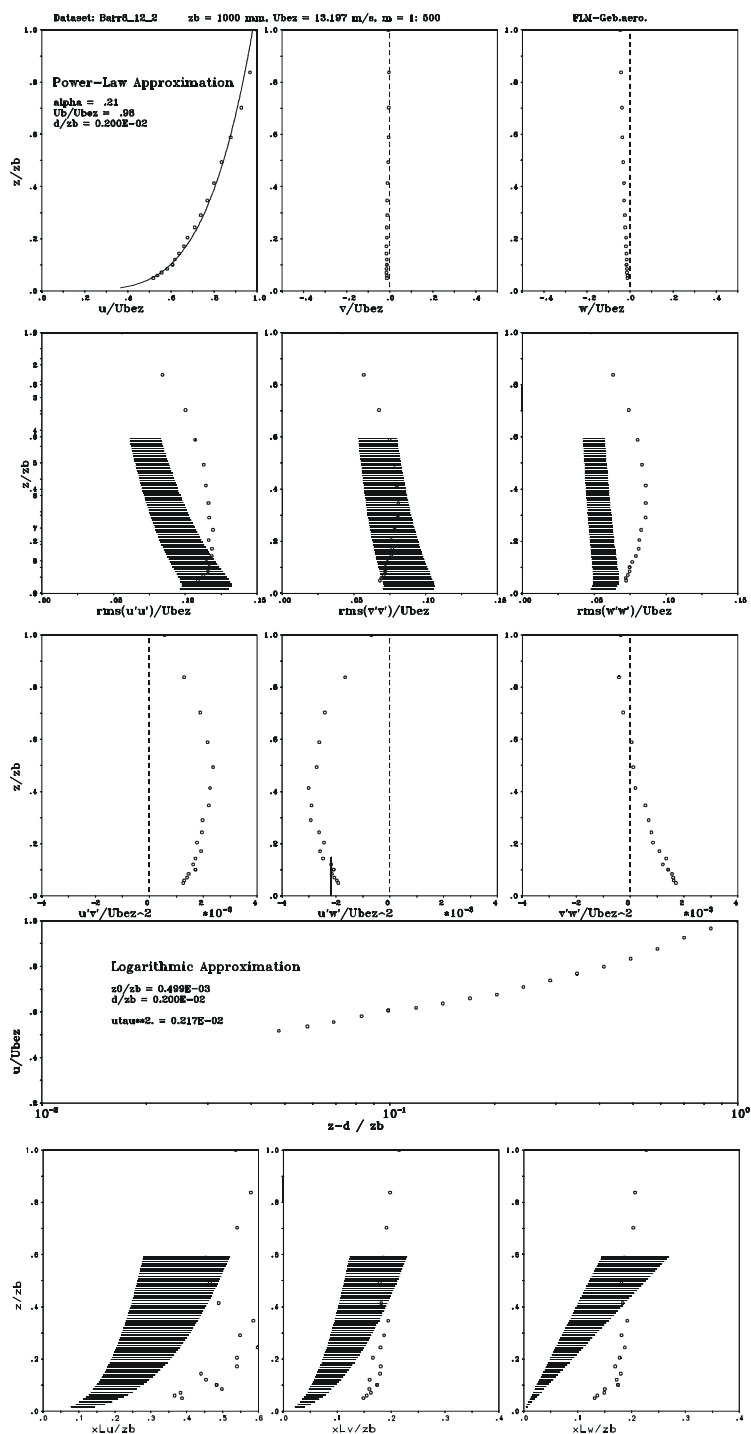
Slika A.11: Mjerilo 1:500, barijera 5, podna hrapavost R4



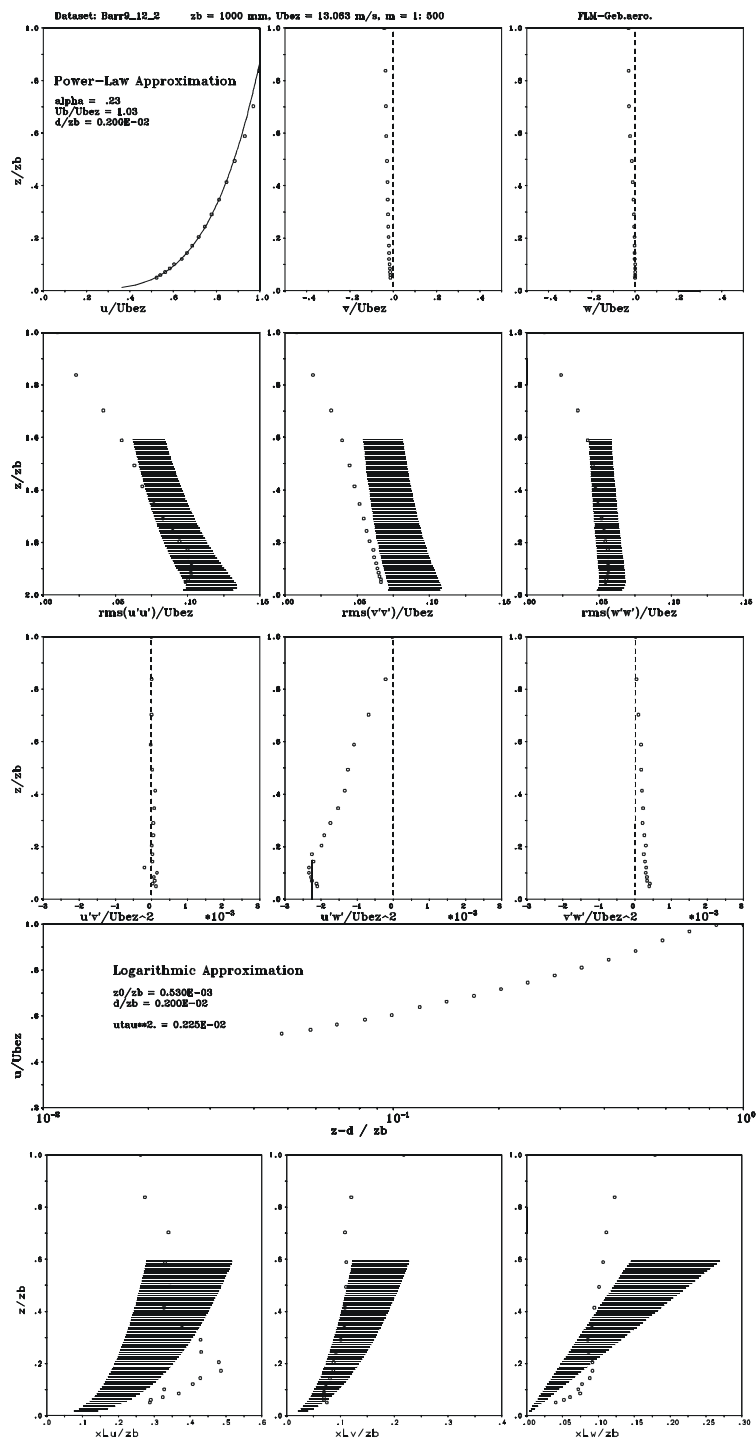
Slika A.12: Mjerilo 1:500, barijera 6, podna hrapavost R4



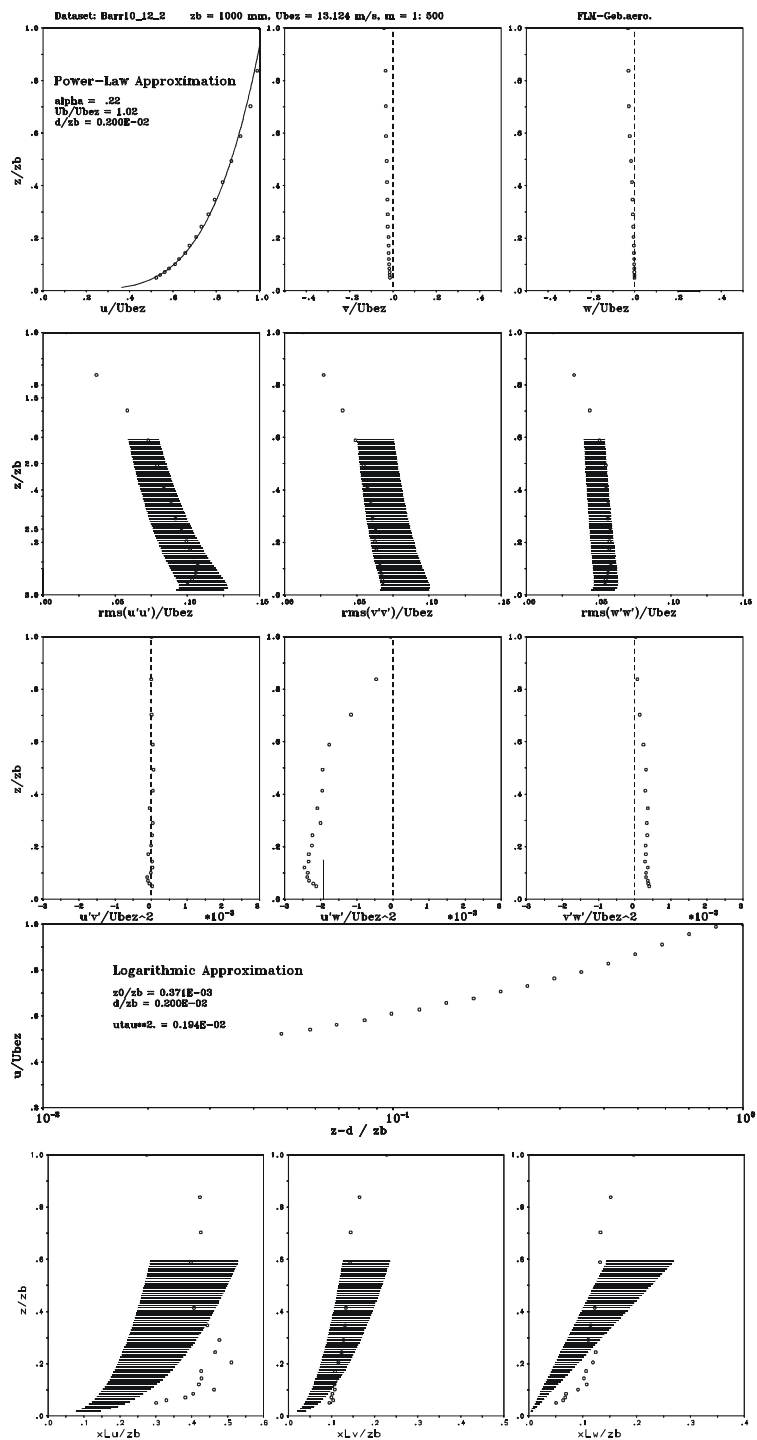
Slika A.13: Mjerilo 1:500, barijera 7, podna hrapavost R4



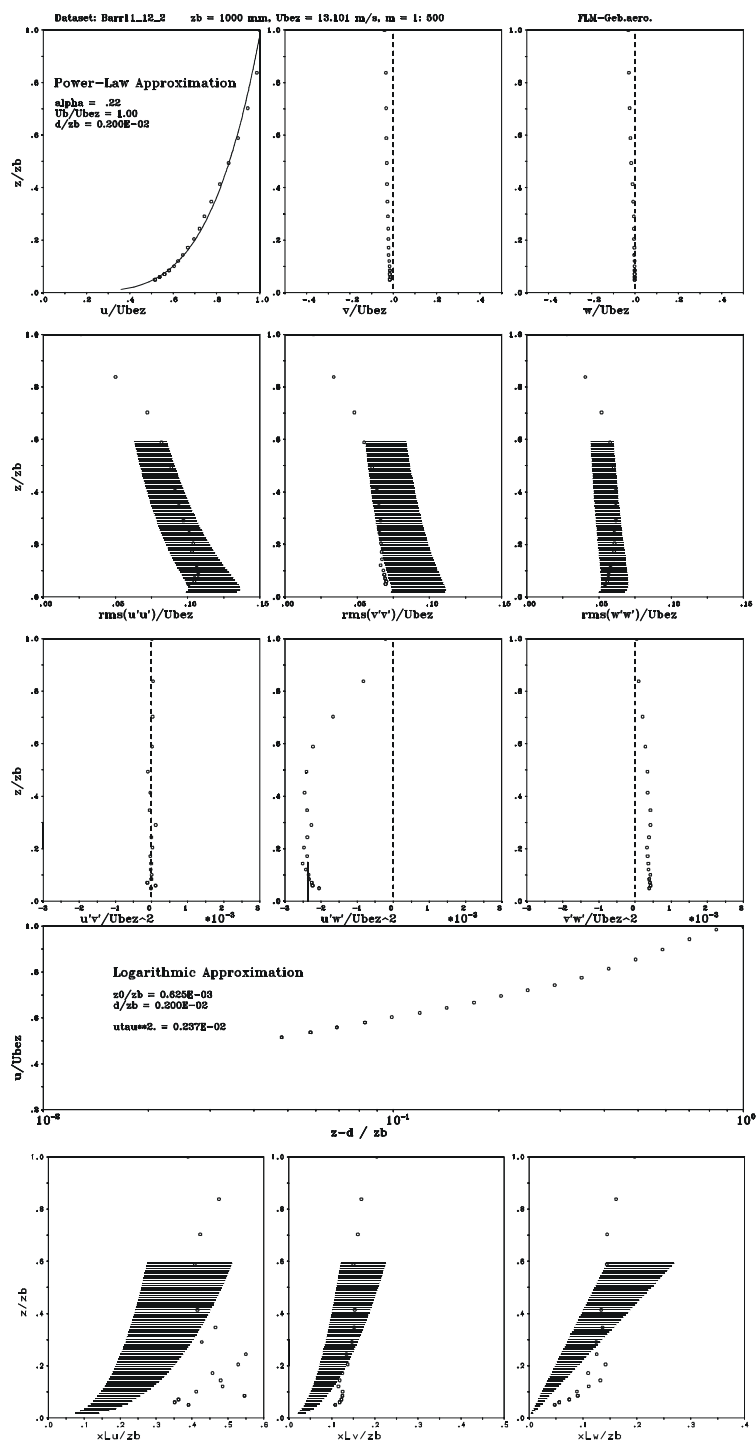
Slika A.14: Mjerilo 1:500, barijera 8, podna hrapavost R4



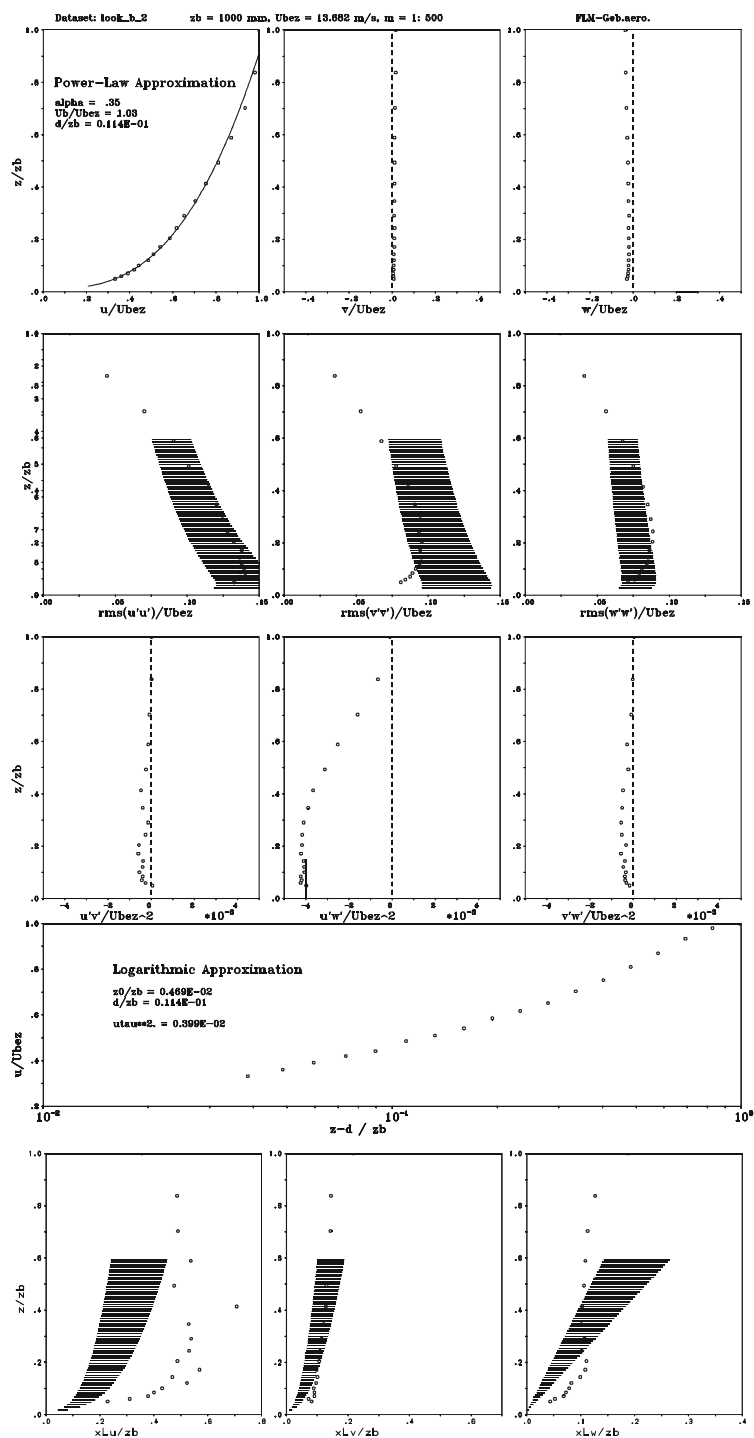
Slika A.15: Mjerilo 1:500, barijera 9, podna hrapavost R4



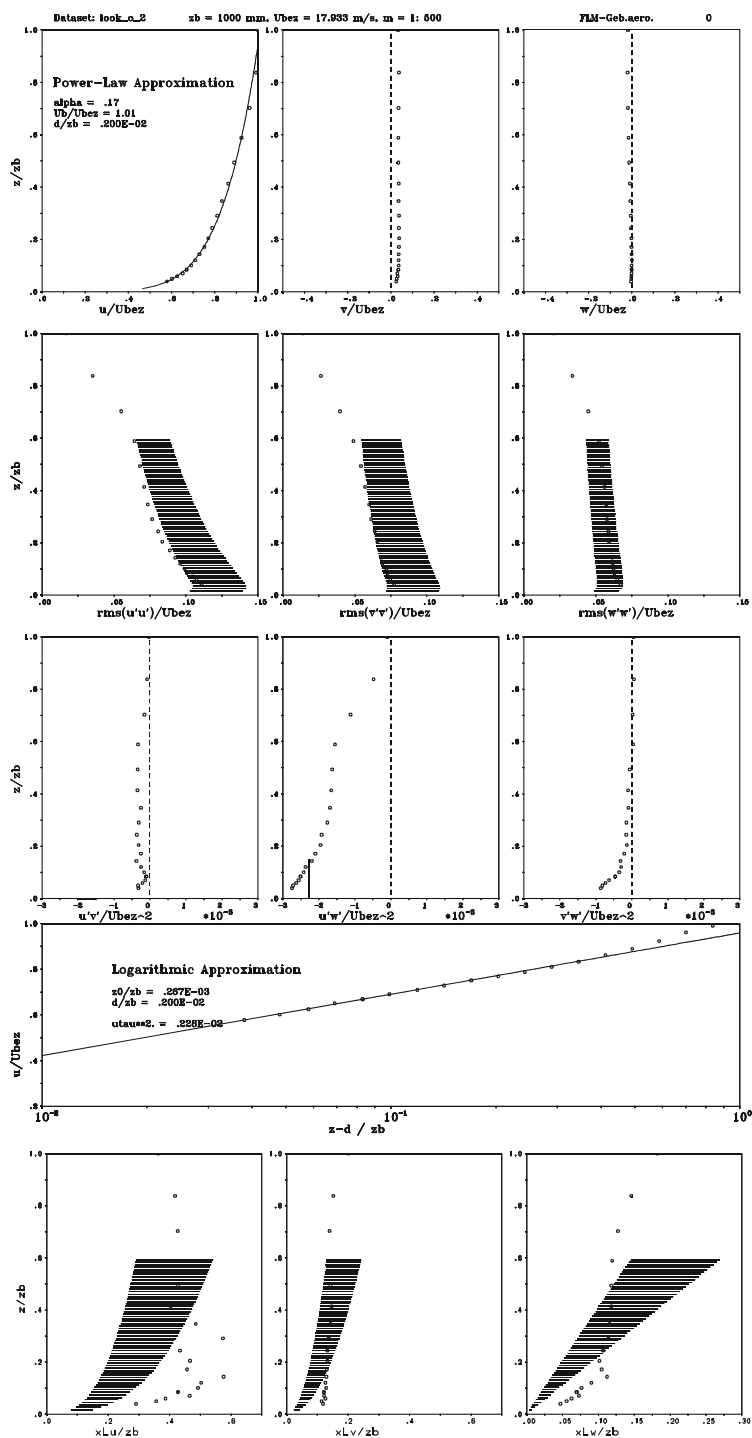
Slika A.16: Mjerilo 1:500, barijera 10, podna hrapavost R4



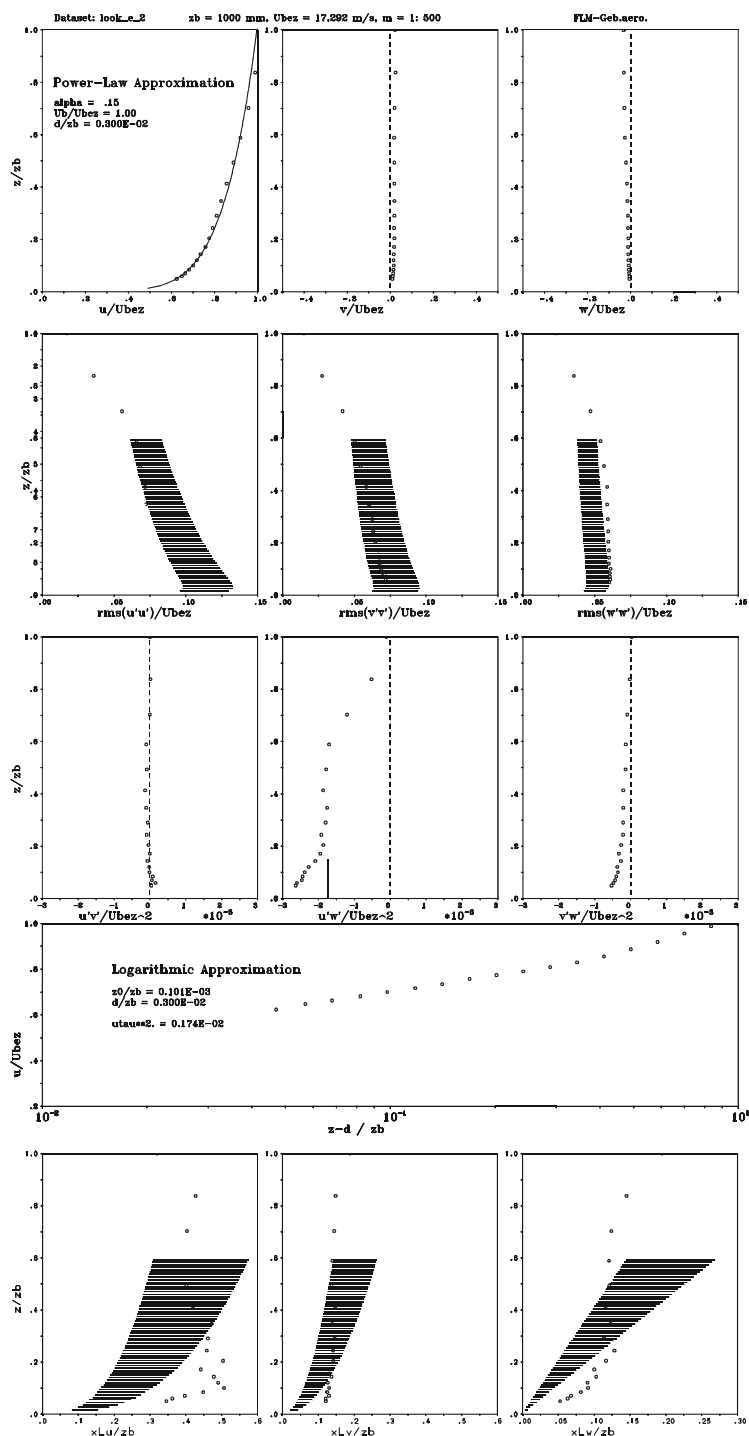
Slika A.17: Mjerilo 1:500, barijera 11, podna hrapavost R4



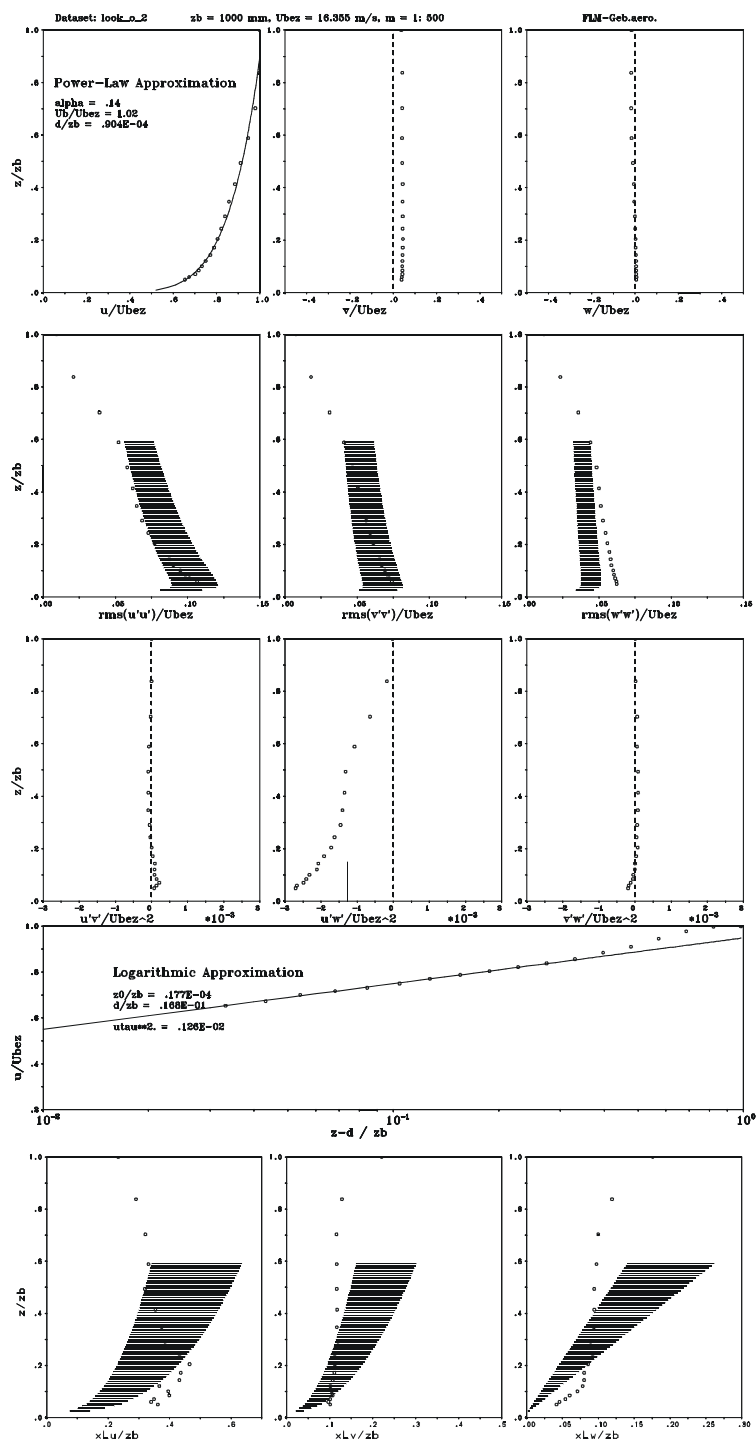
Slika A.18: Mjerilo 1:500, barijera 5, podna hrapavost R6



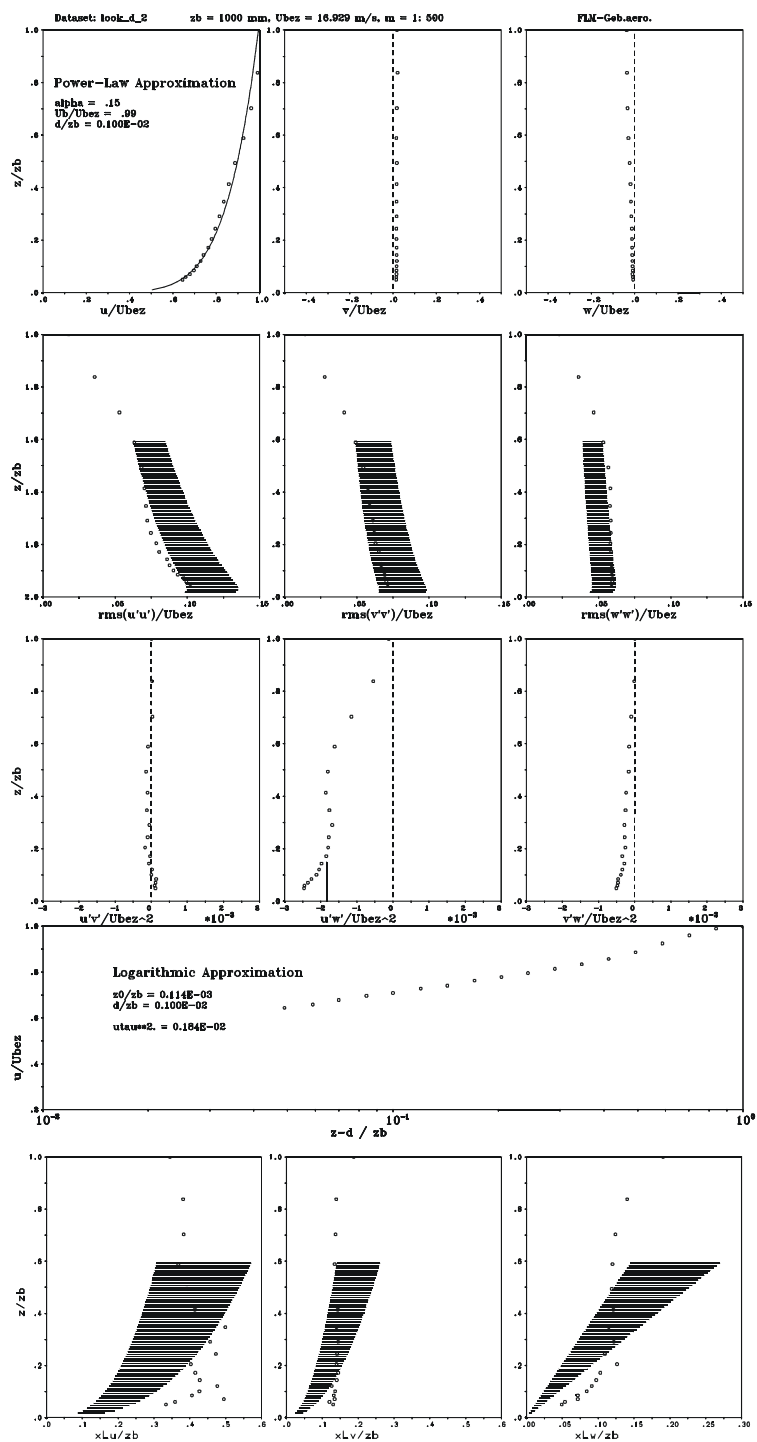
Slika A.19: Mjerilo 1:500, barijera 5, podna hrapavost R7



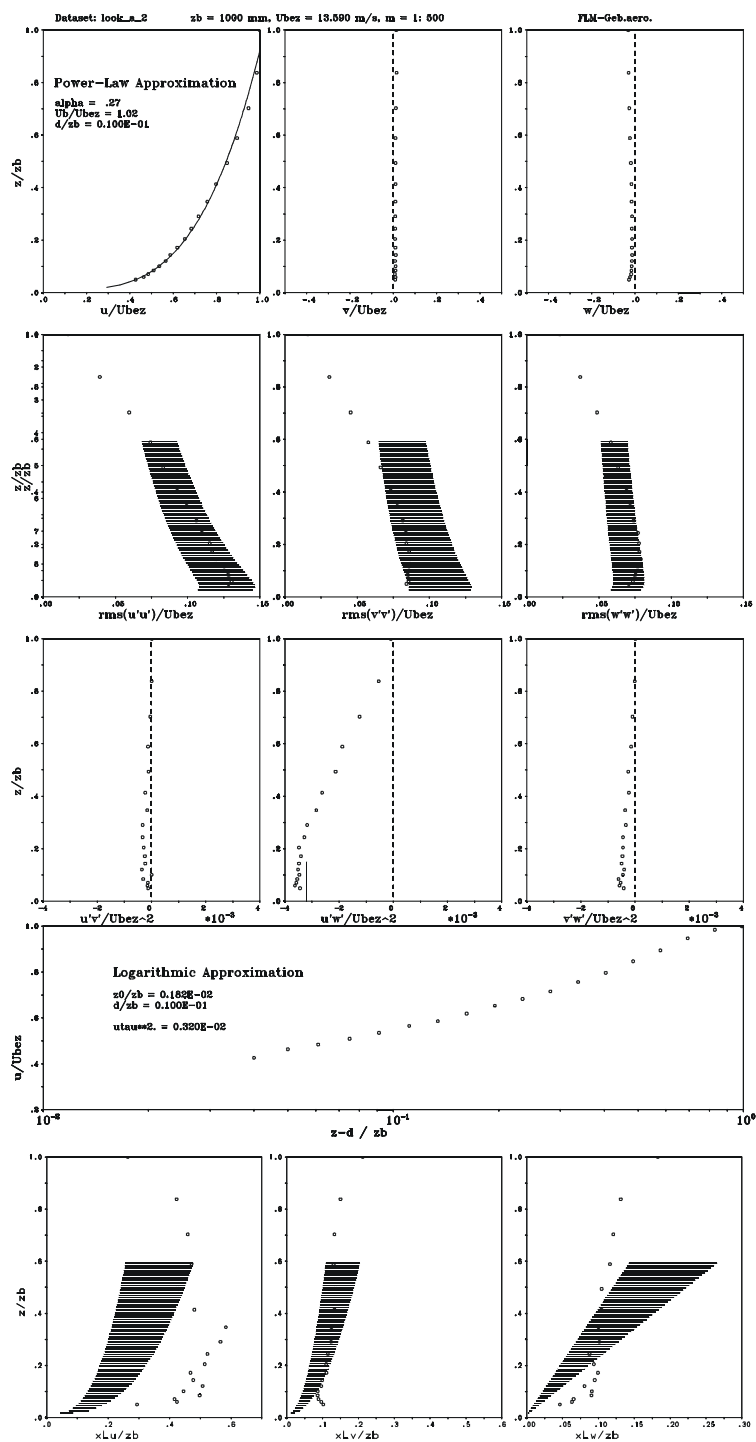
Slika A.20: Mjerilo 1:500, barijera 5, podna hrapavost R9



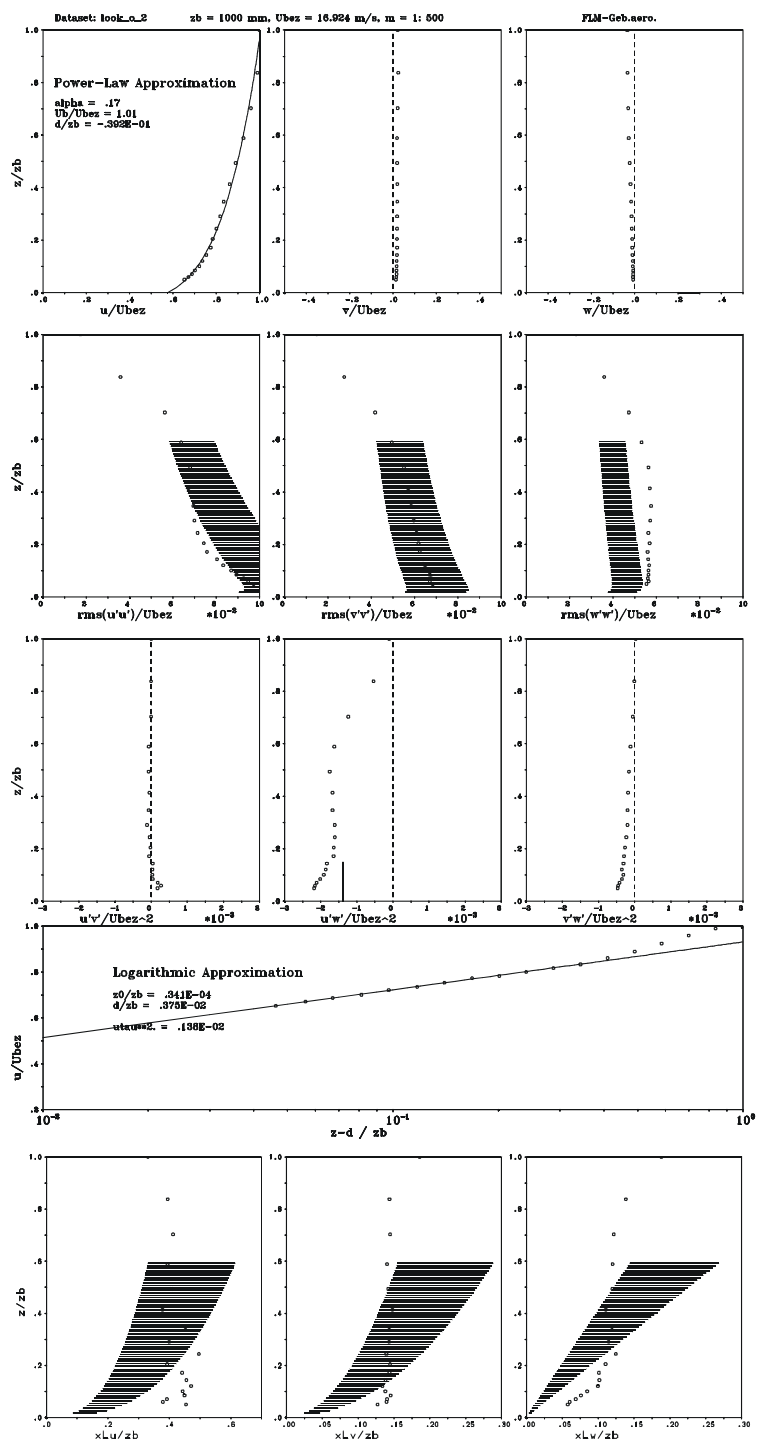
Slika A.21: Mjerilo 1:500, barijera 3, podna hrapavost R9



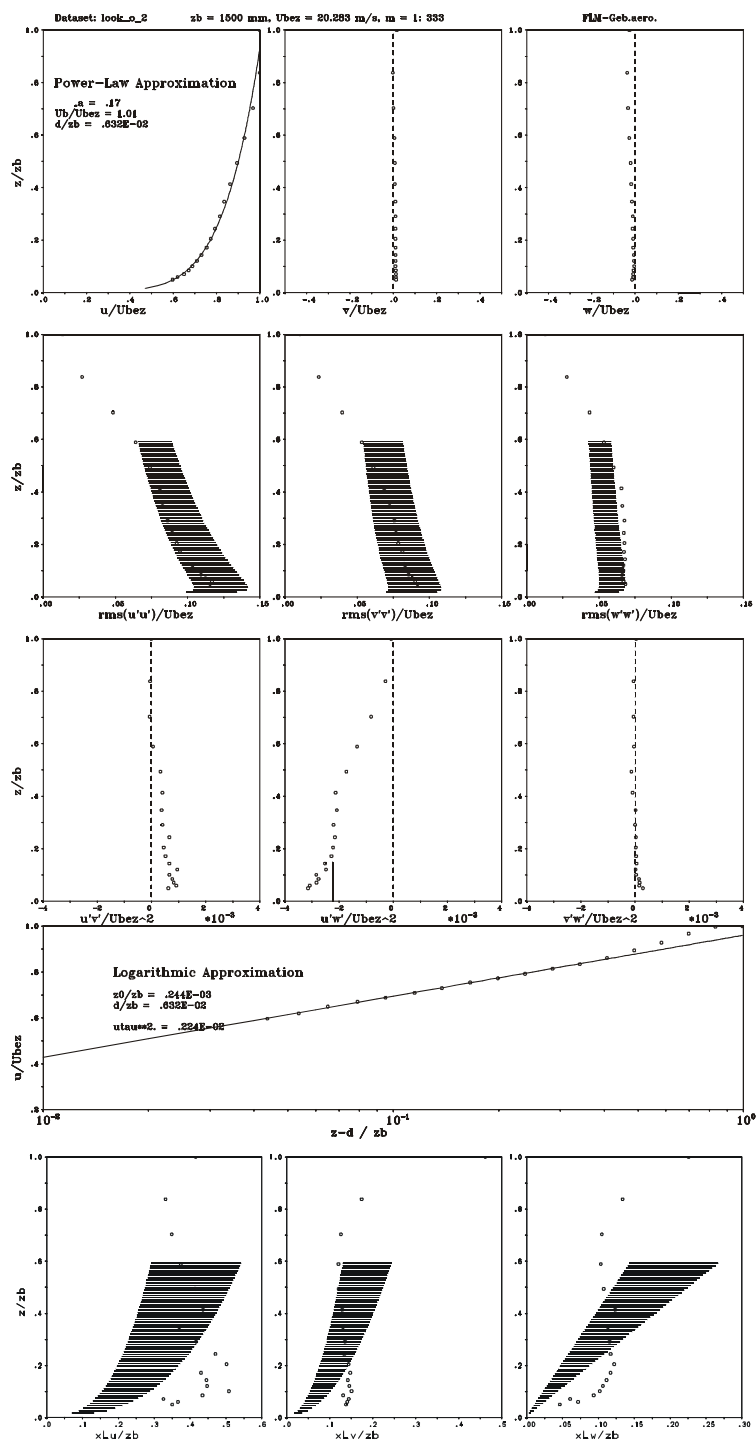
Slika A.22: Mjerilo 1:500, barijera 5, podna hrapavost R8



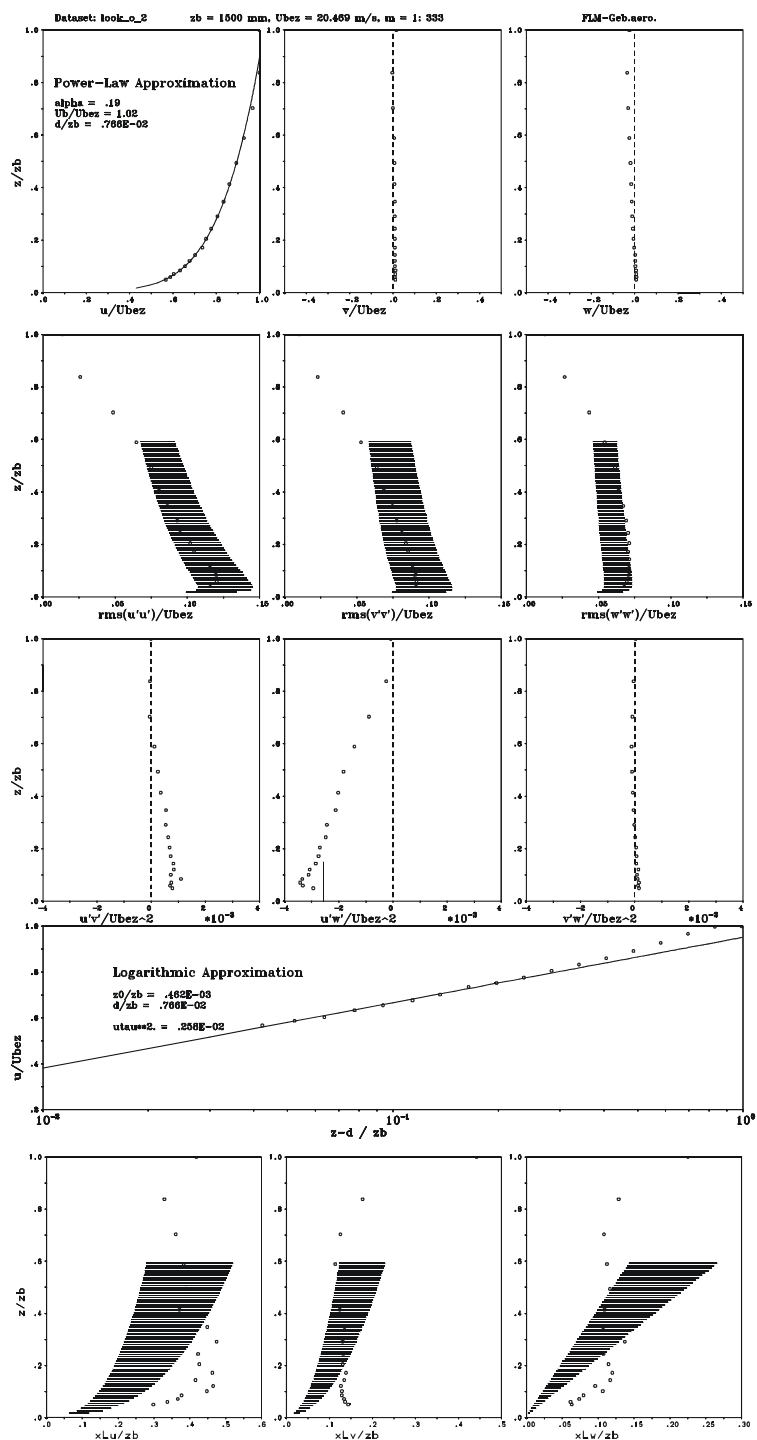
Slika A.23: Mjerilo 1:500, barijera 5, podna hrapavost R5



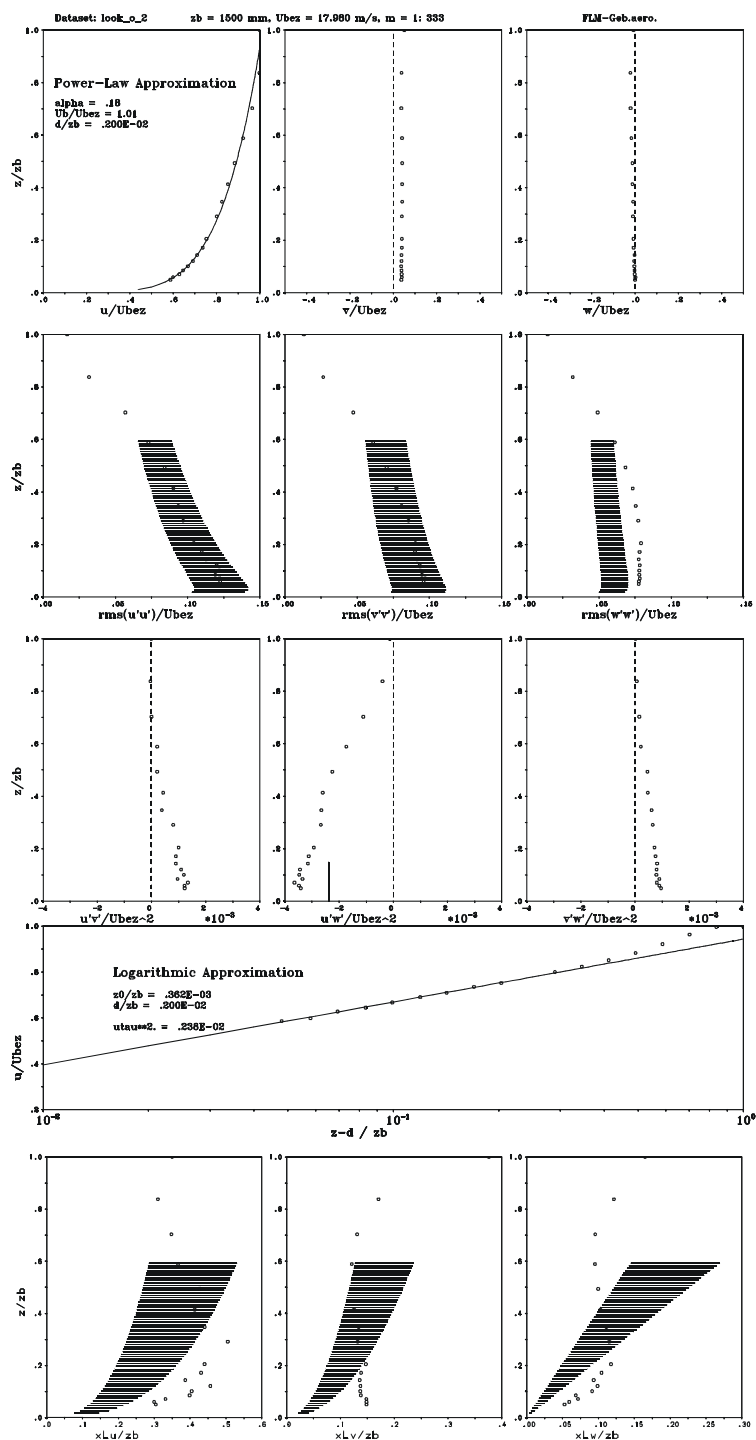
Slika A.24: Mjerilo 1:500, barijera 5, podna hrapavost R10



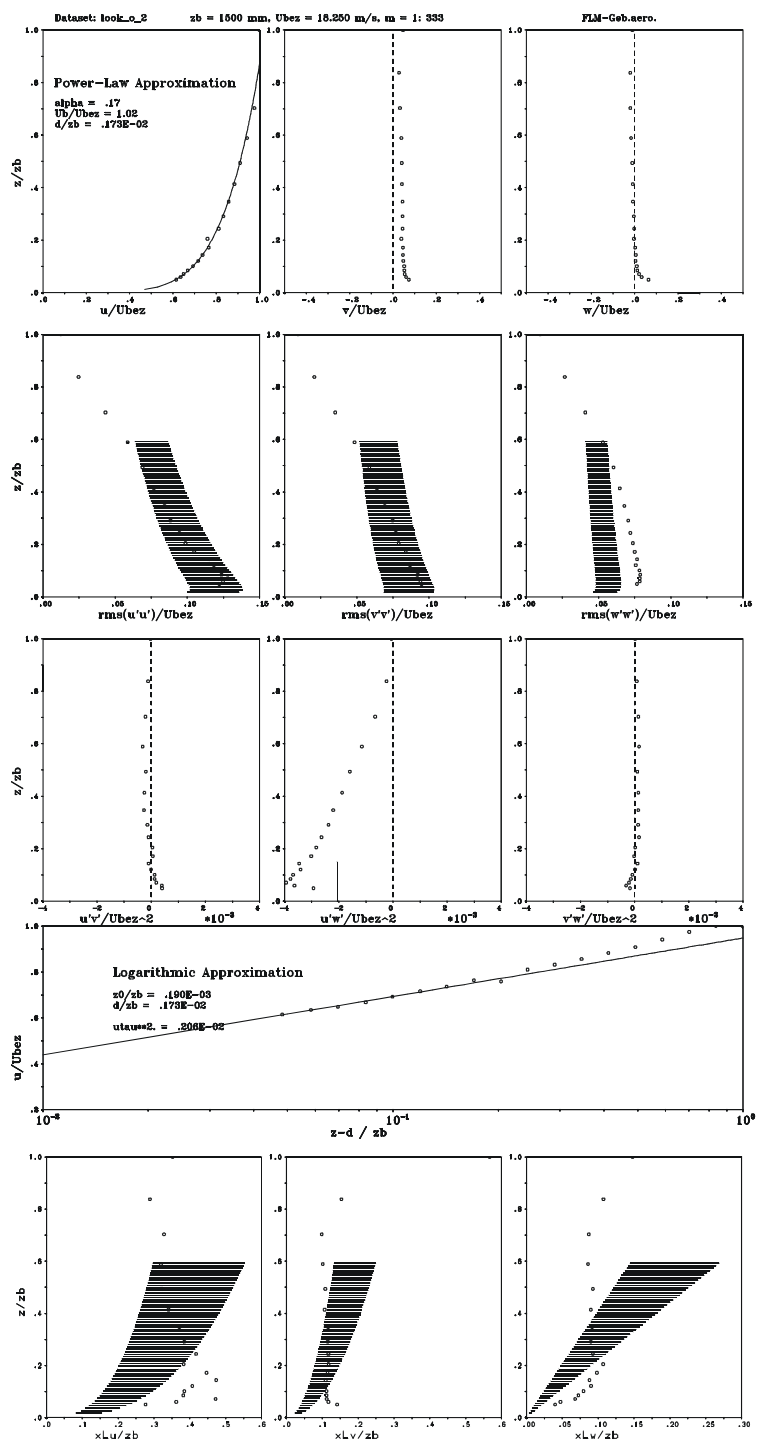
Slika A.25: Mjerilo 1:333, barijera 12, podna hrapavost R16



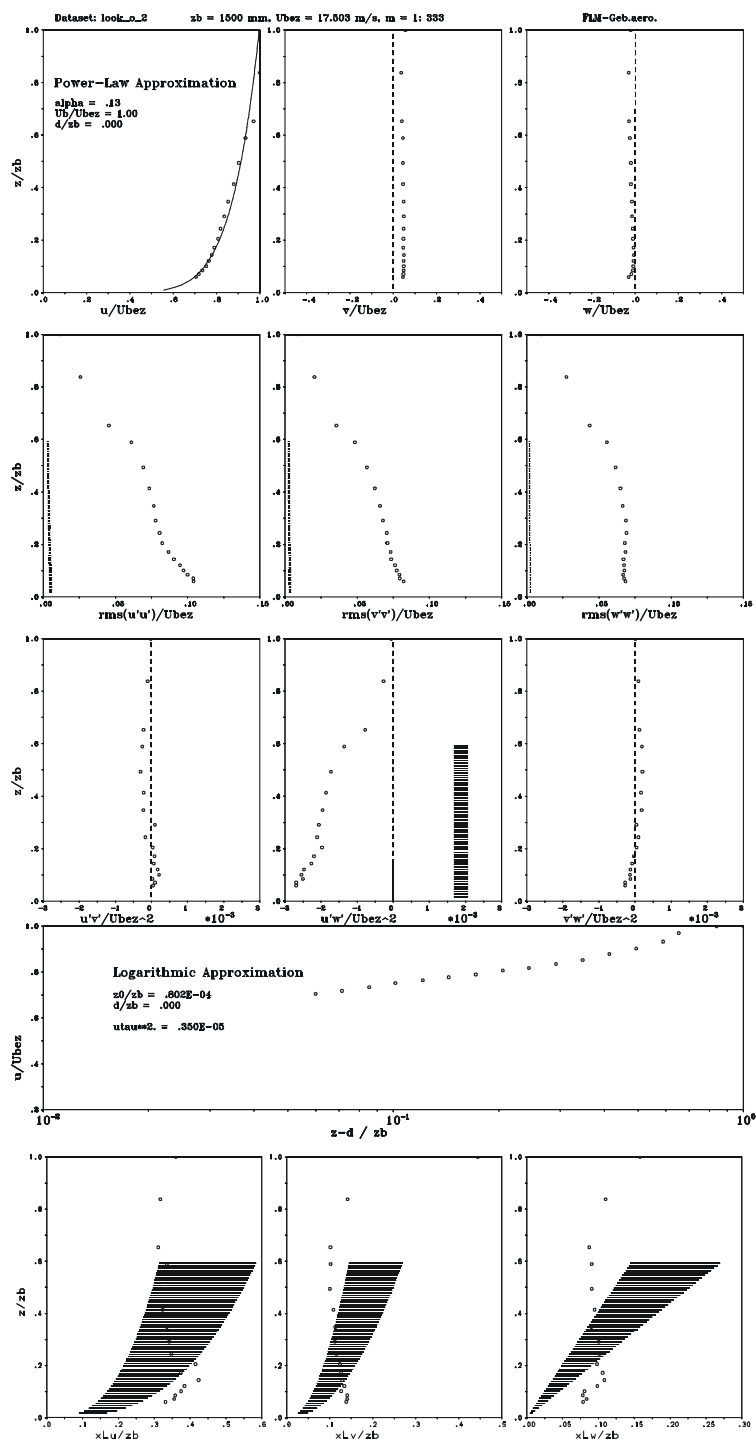
Slika A.26: Mjerilo 1:333, barijera 12, podna hrapavost R13



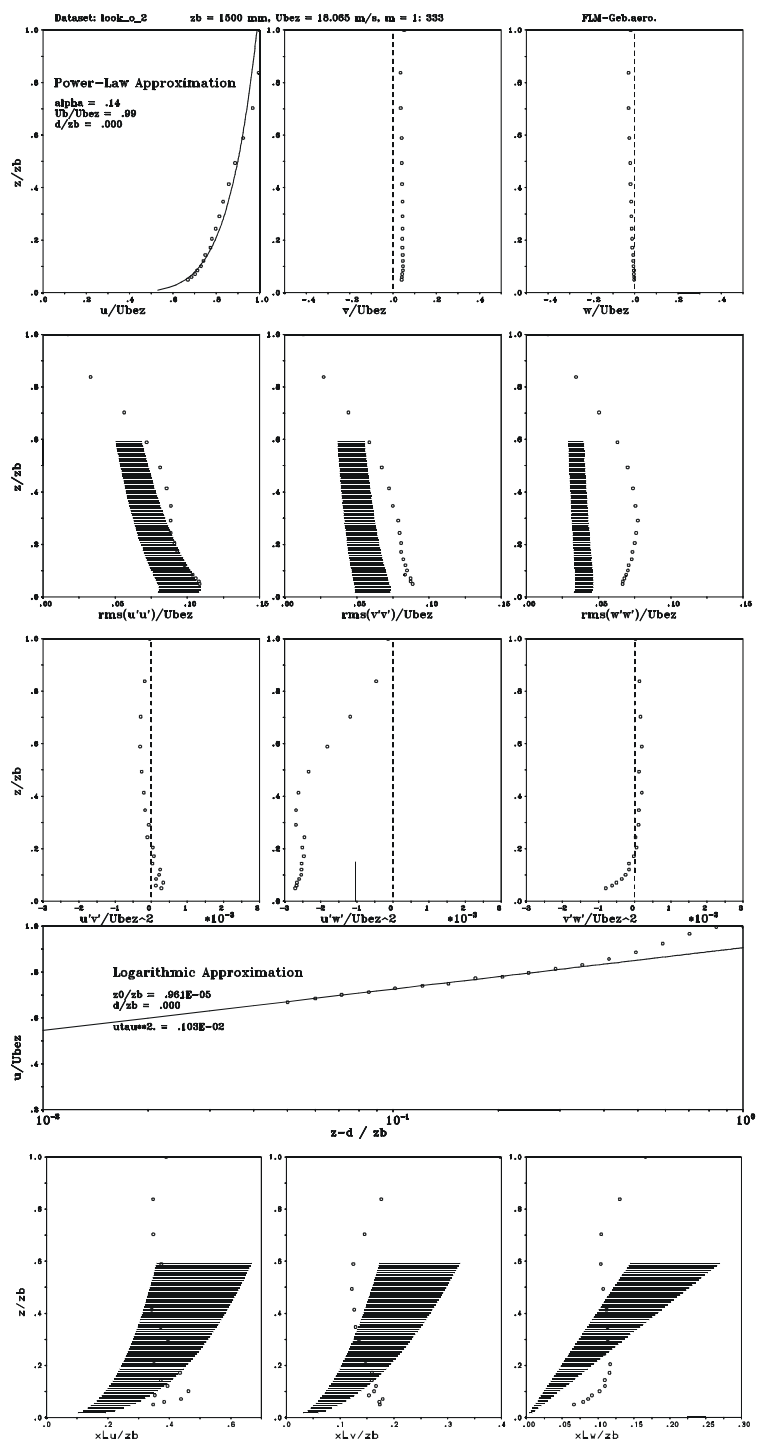
Slika A.27: Mjerilo 1:333, barijera 13, podna hrapavost R13



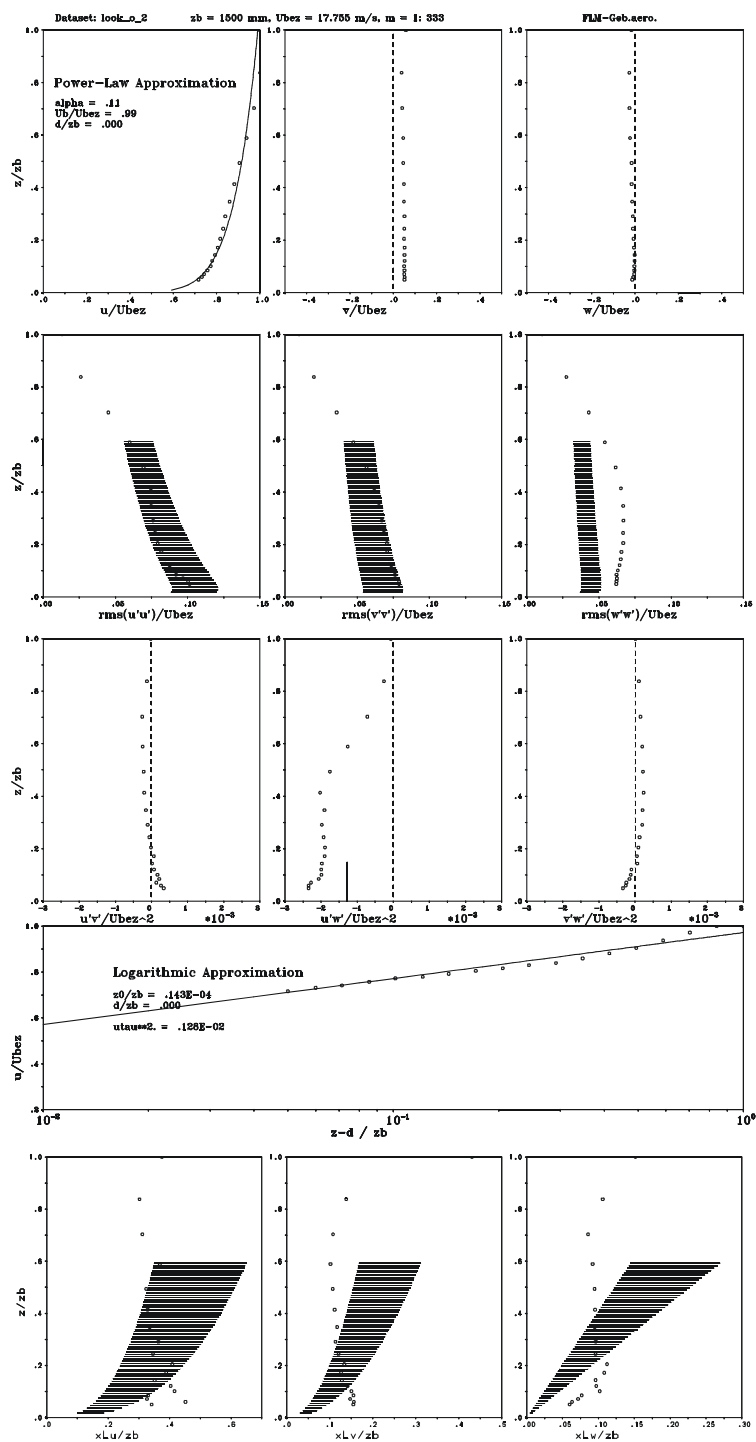
Slika A.28: Mjerilo 1:333, barijera 14, podna hrapavost R13



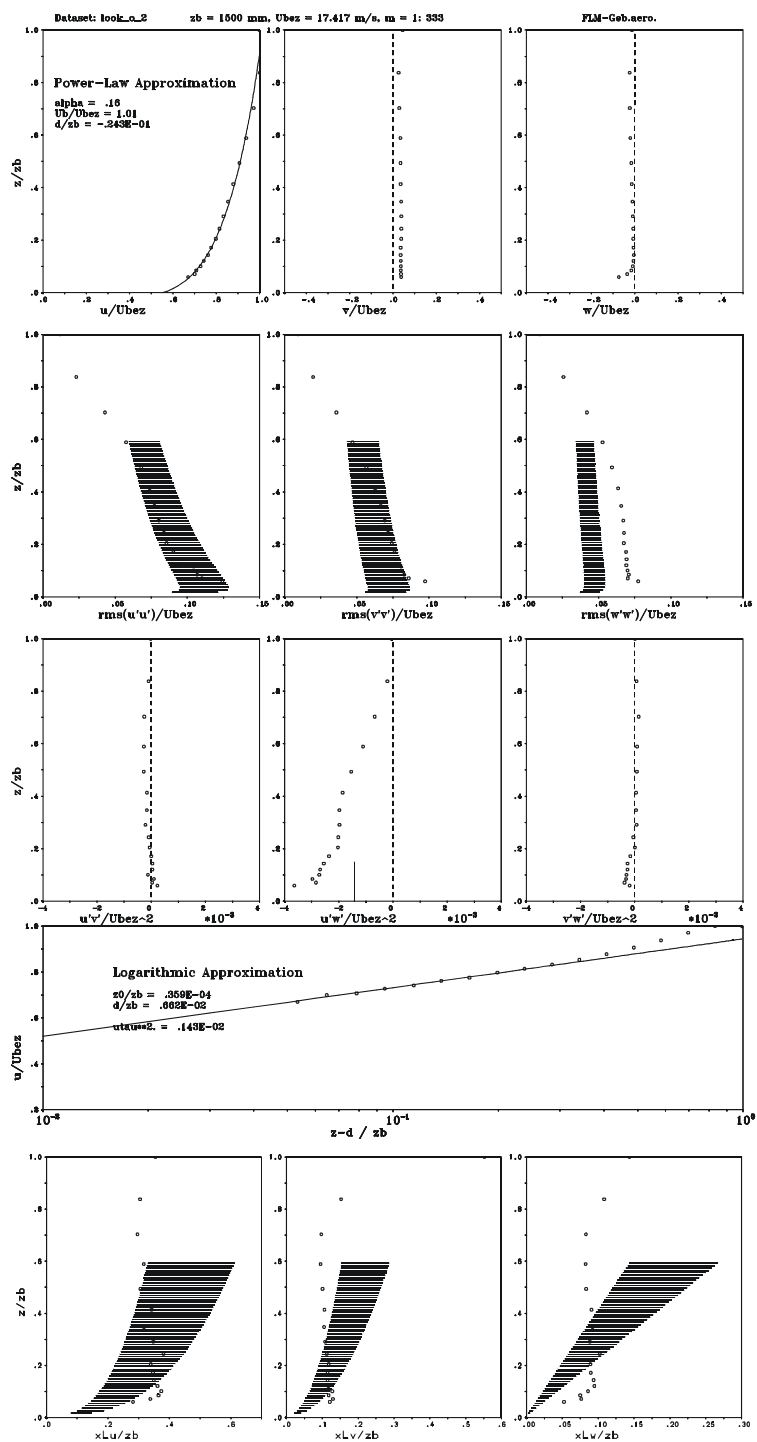
Slika A.29: Mjerilo 1:333, barijera 14, podna hrapavost R11



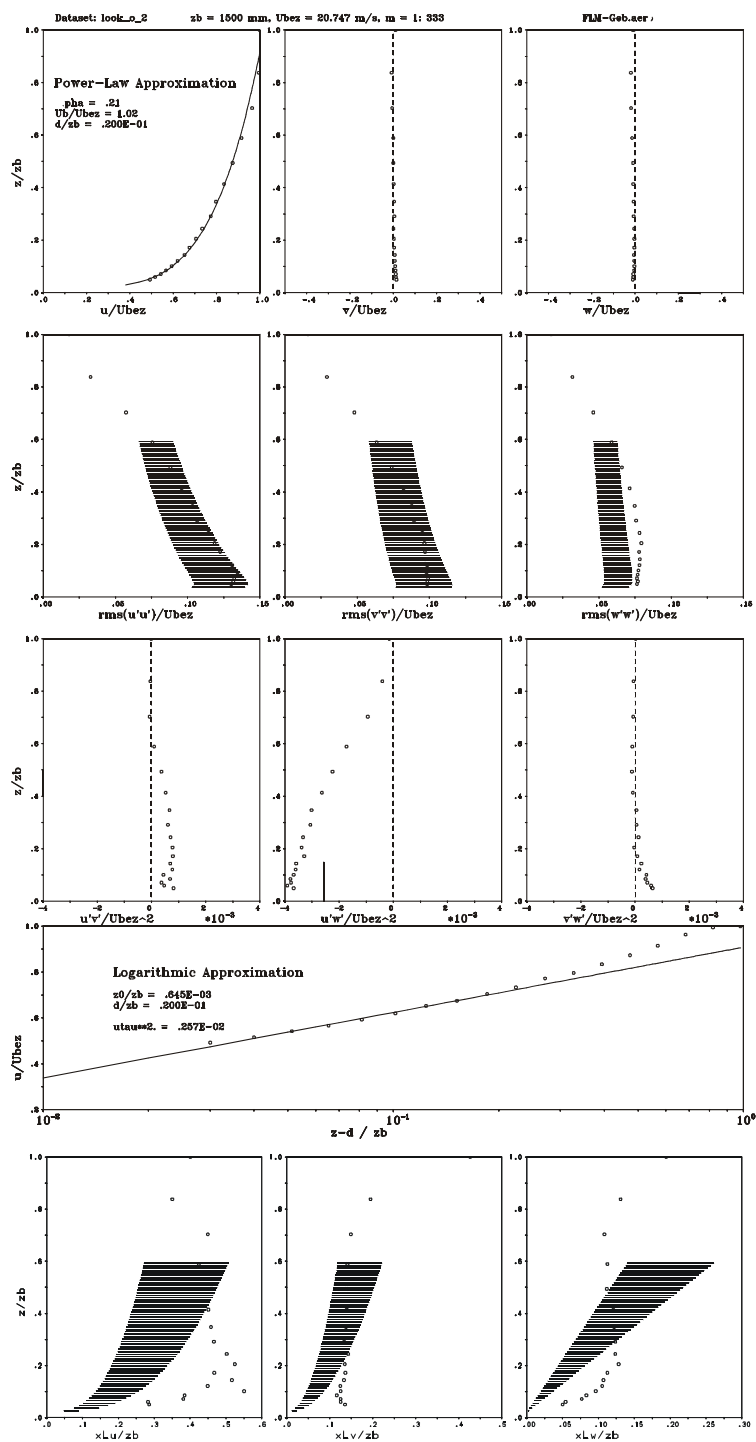
Slika A.30: Mjerilo 1:333, barijera 13, podna hrapavost R7



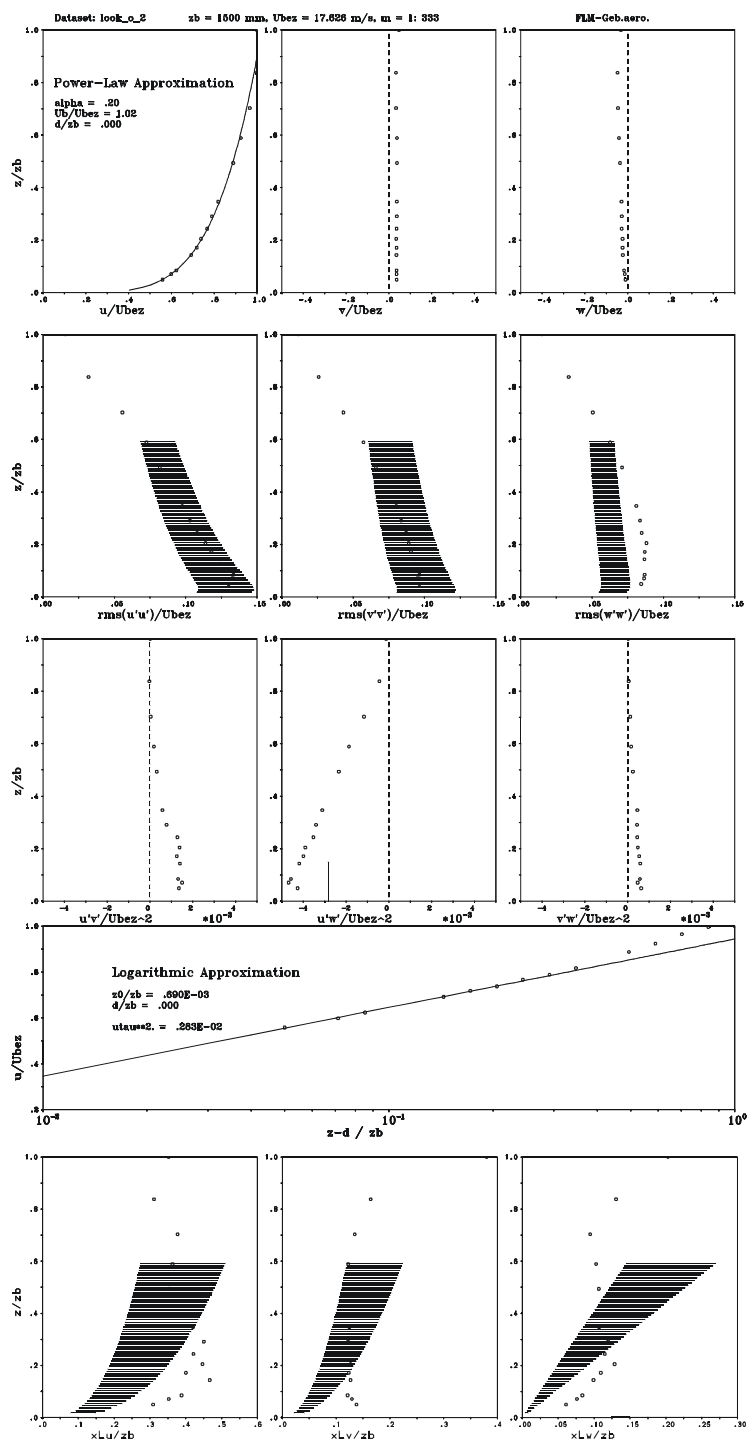
Slika A.31: Mjerilo 1:333, barijera 14, podna hrapavost R10



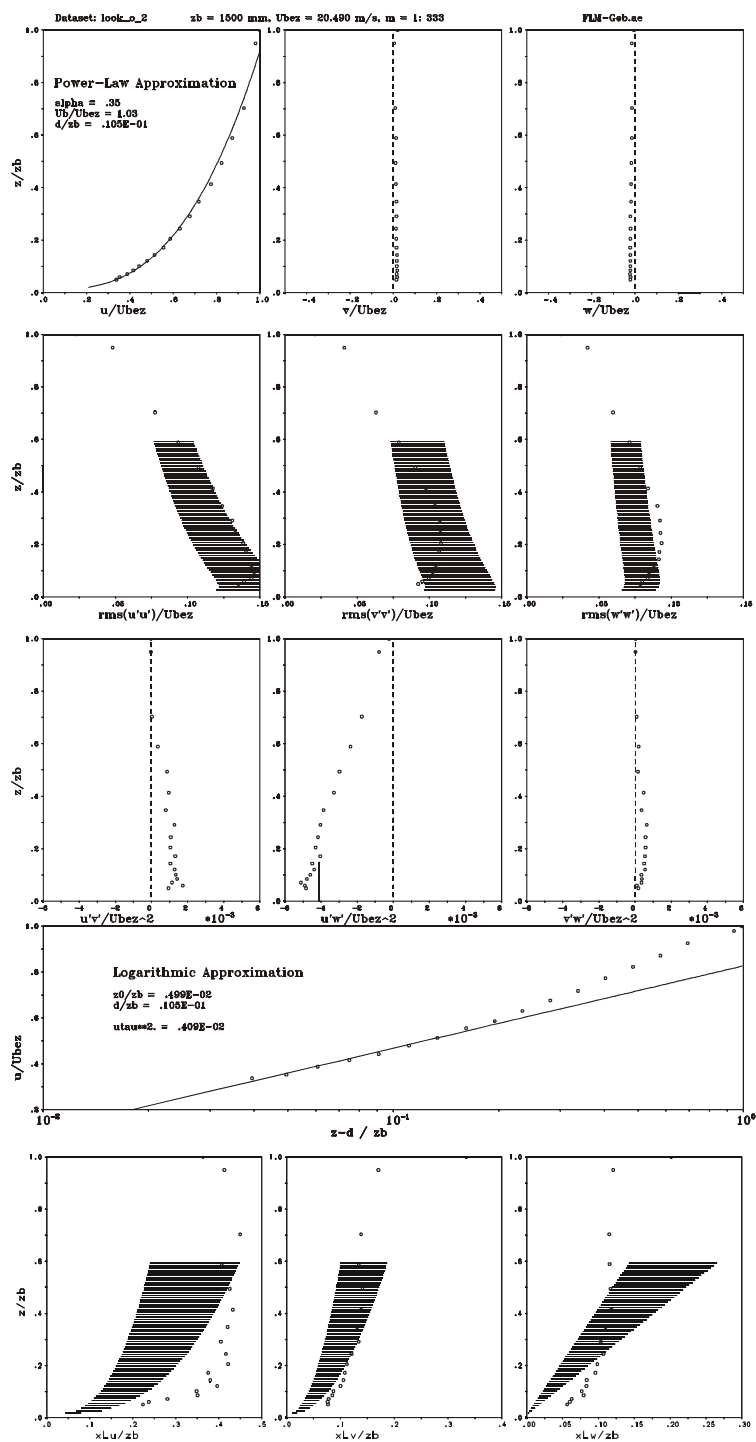
Slika A.32: Mjerilo 1:333, barijera 14, podna hrapavost R12



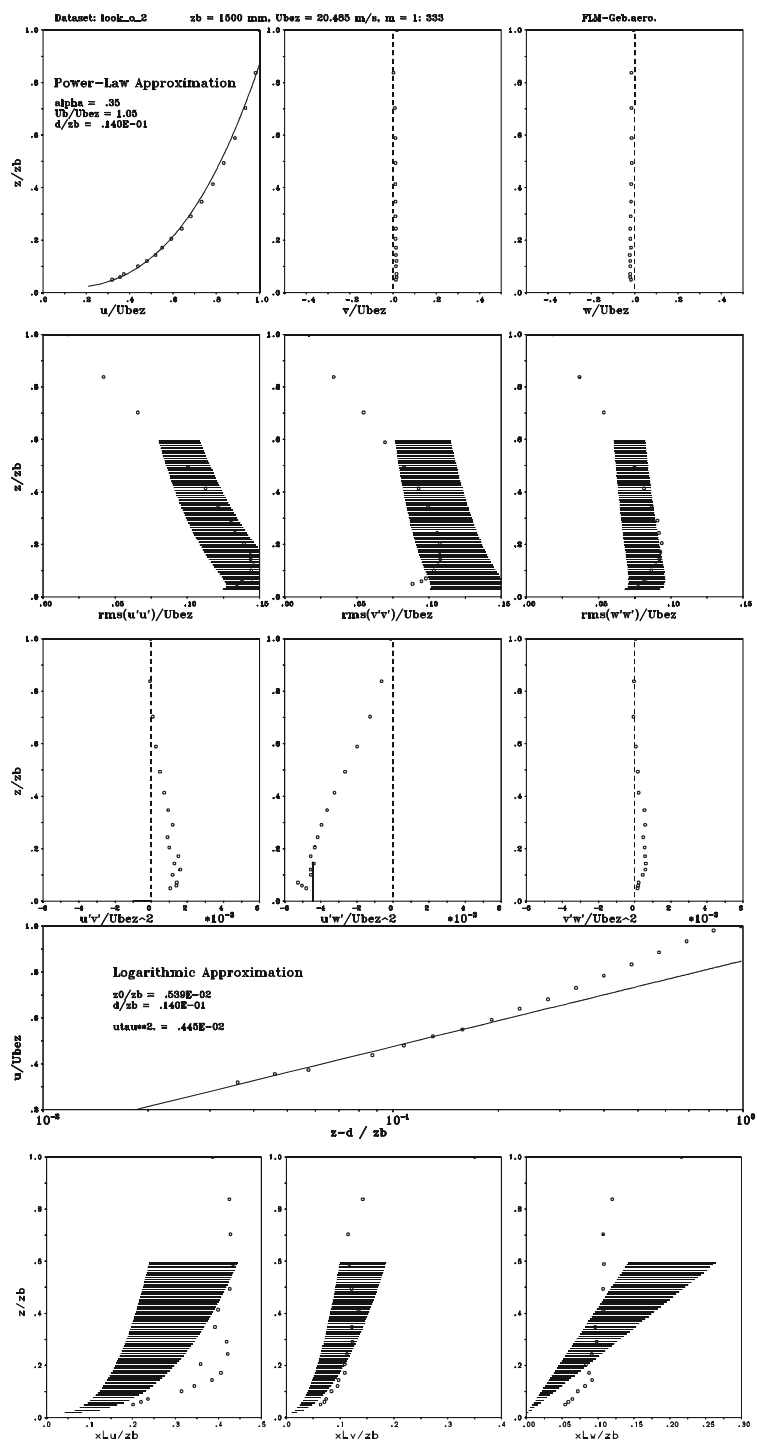
Slika A.33: Mjerilo 1:333, barijera 13, podna hrapavost R15



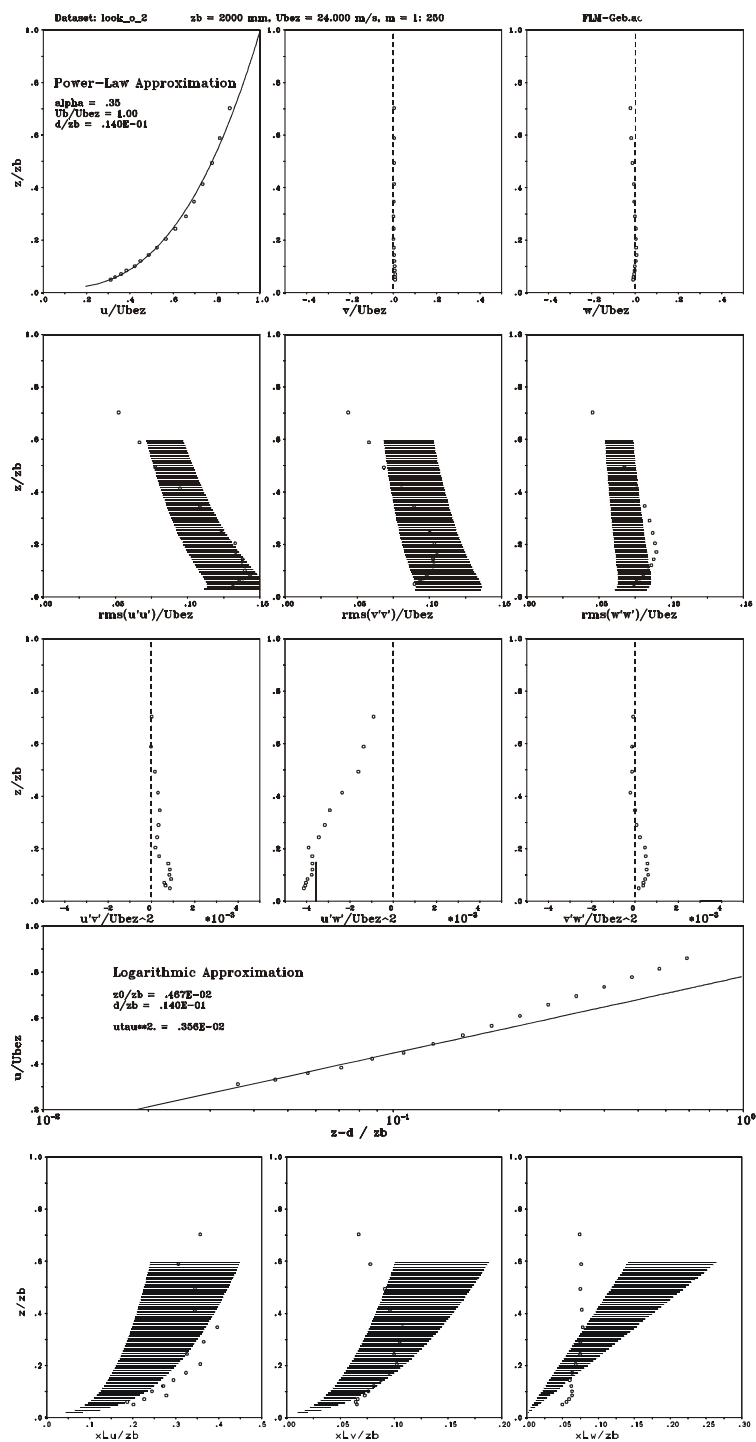
Slika A.34: Mjerilo 1:333, barijera 13, podna hrapavost R14



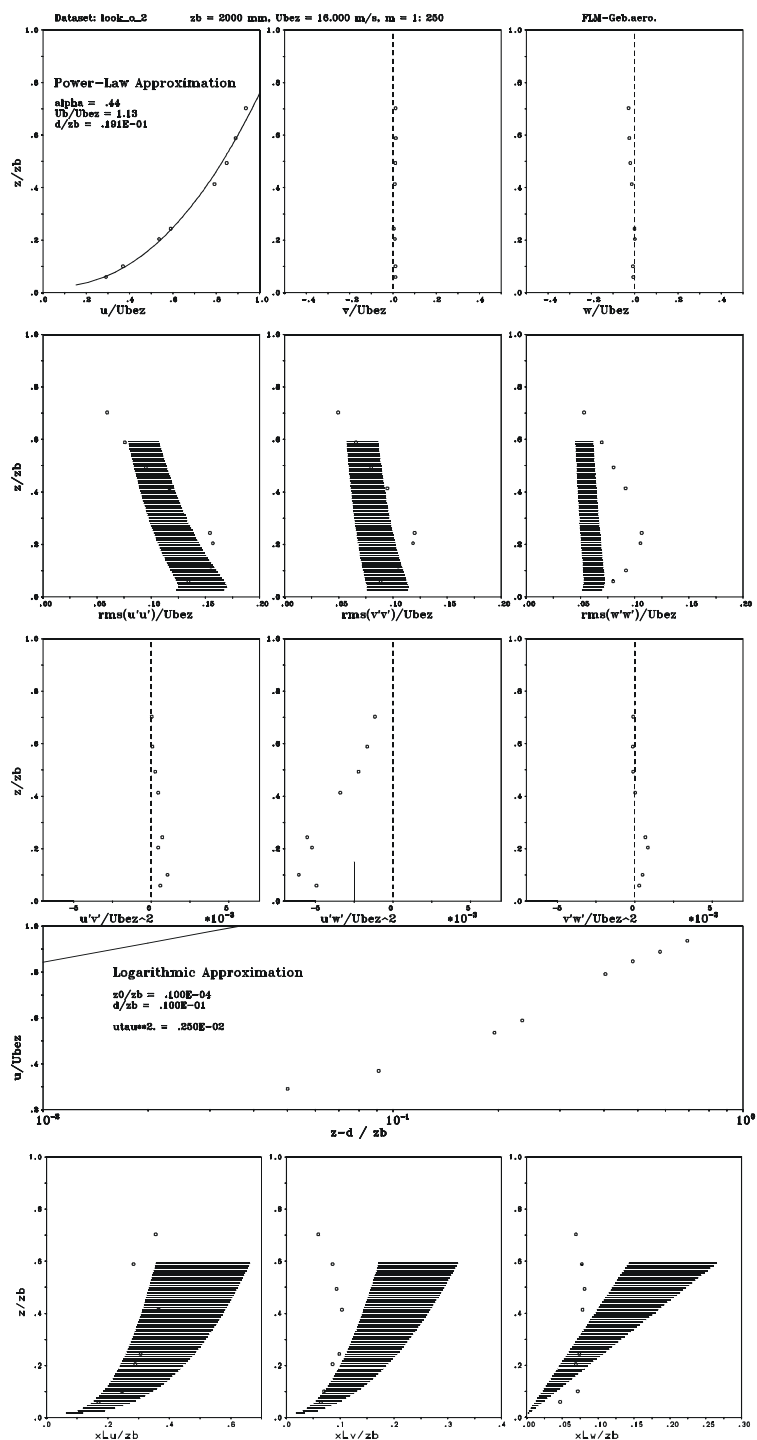
Slika A.35: Mjerilo 1:333, barijera 13, podna hrapavost R17



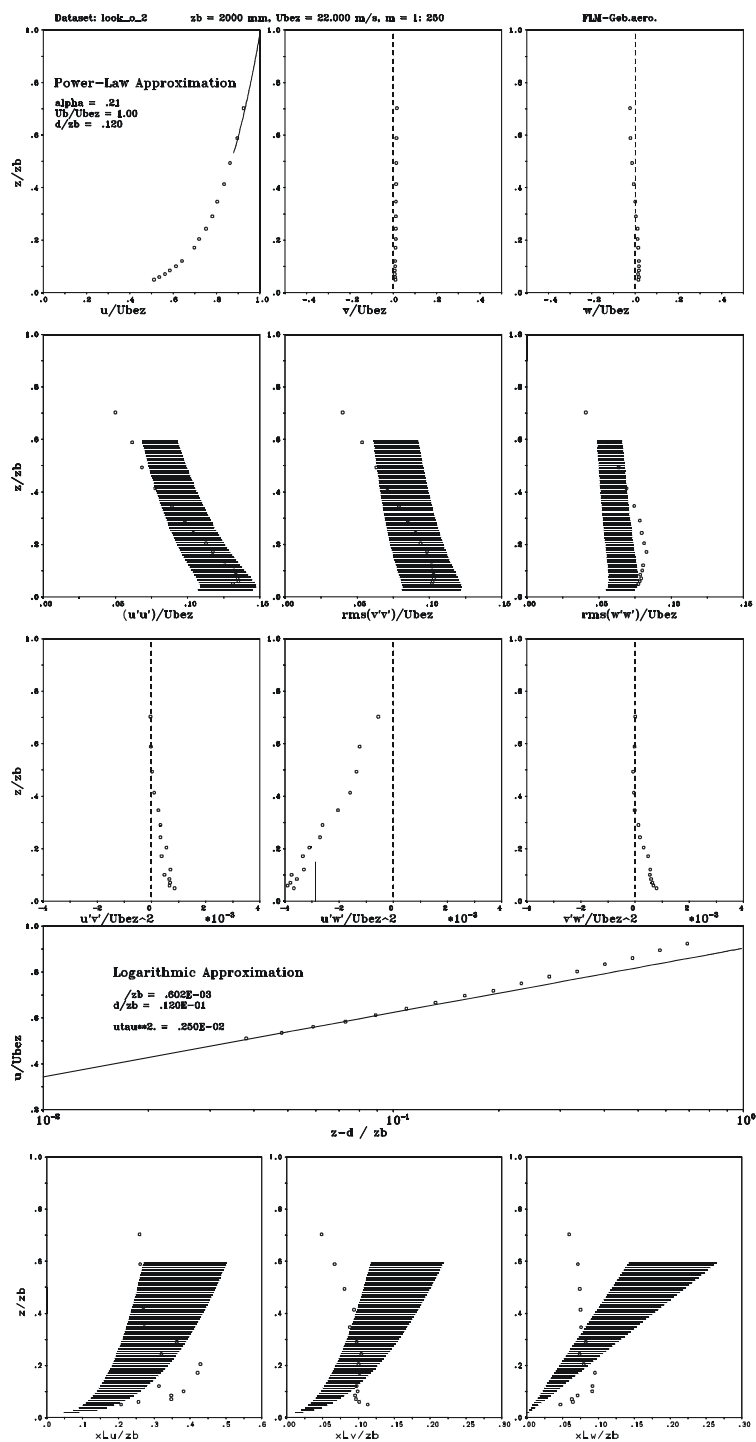
Slika A.36: Mjerilo 1:333, barijera 12, podna hrapavost R17



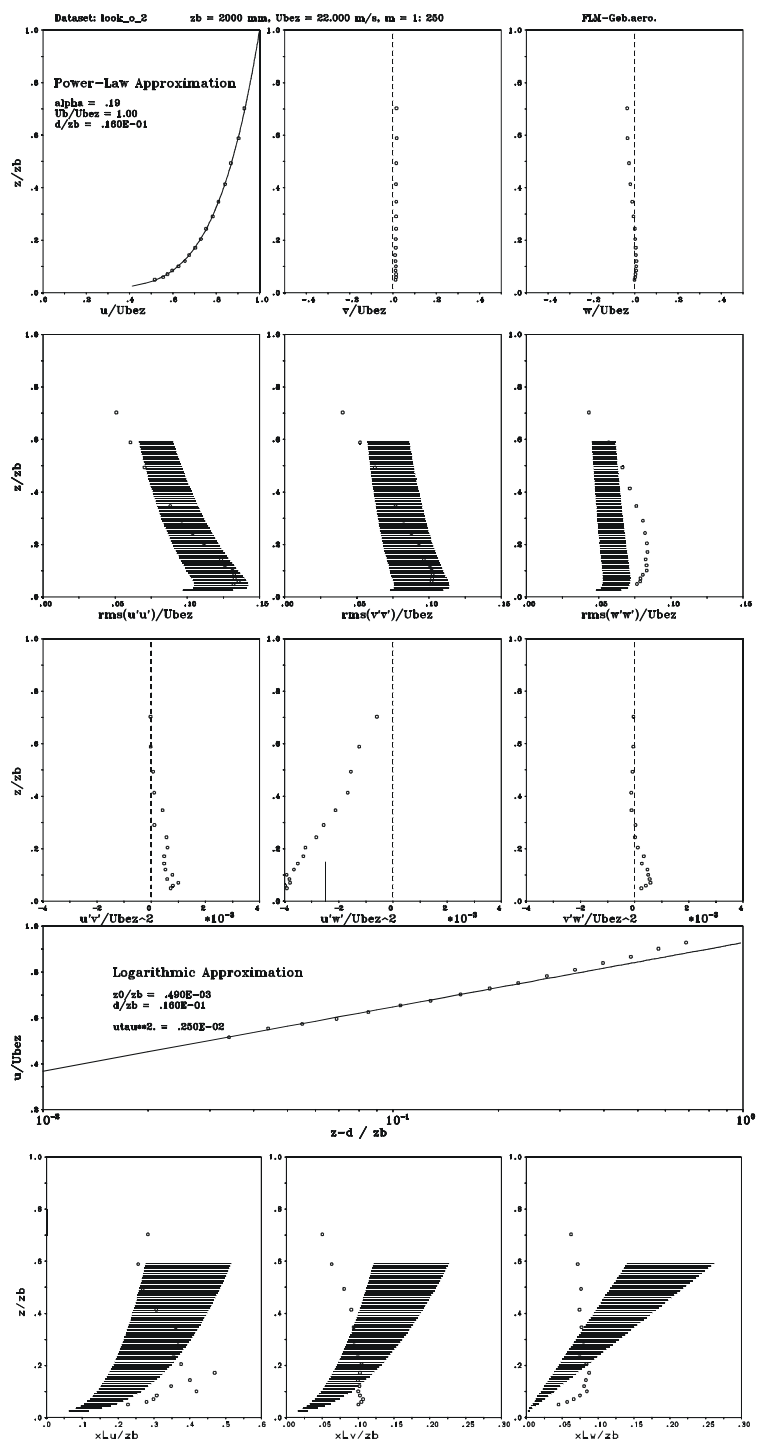
Slika A.37: Mjerilo 1:250, barijera 15, podna hrapavost R17



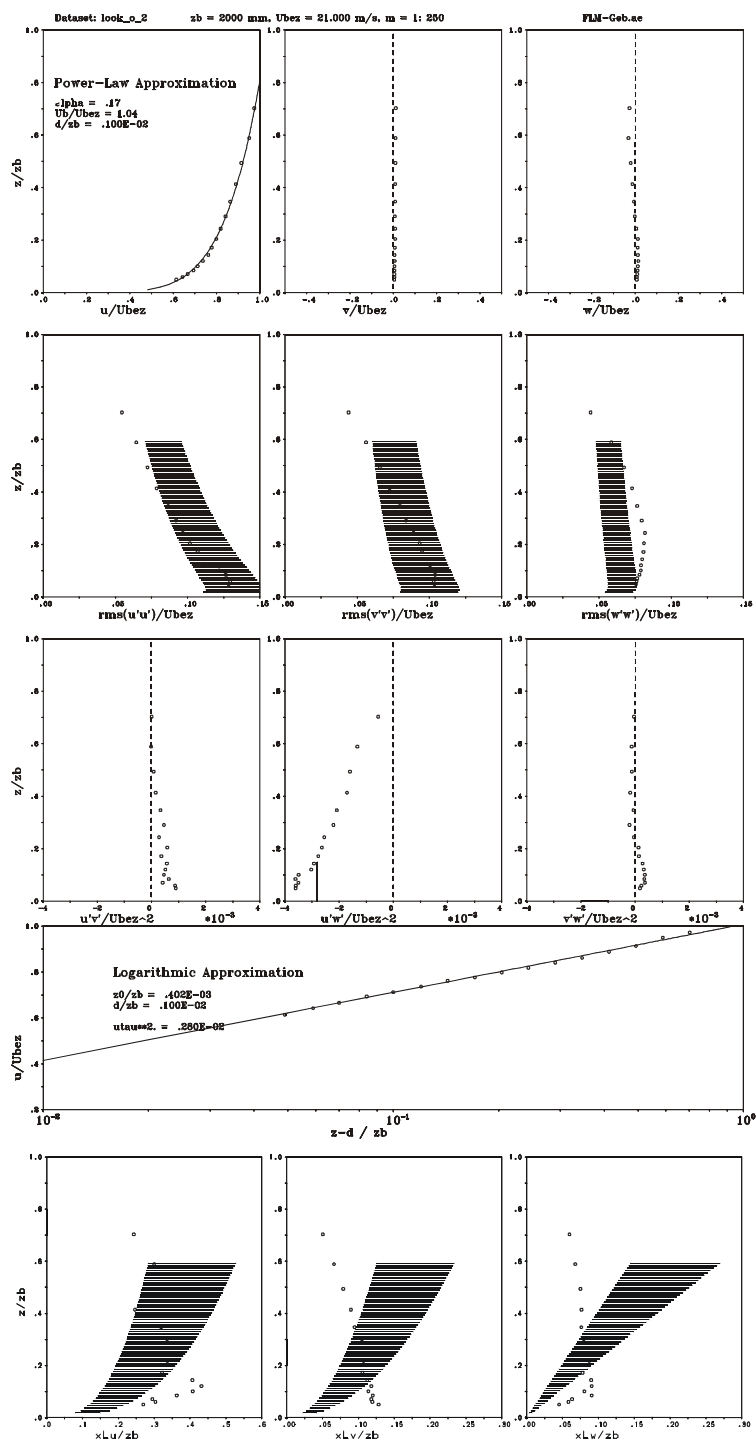
Slika A.38: Mjerilo 1:250, barijera 15, podna hrapavost R18



Slika A.39: Mjerilo 1:250, barijera 15, podna hrapavost R19



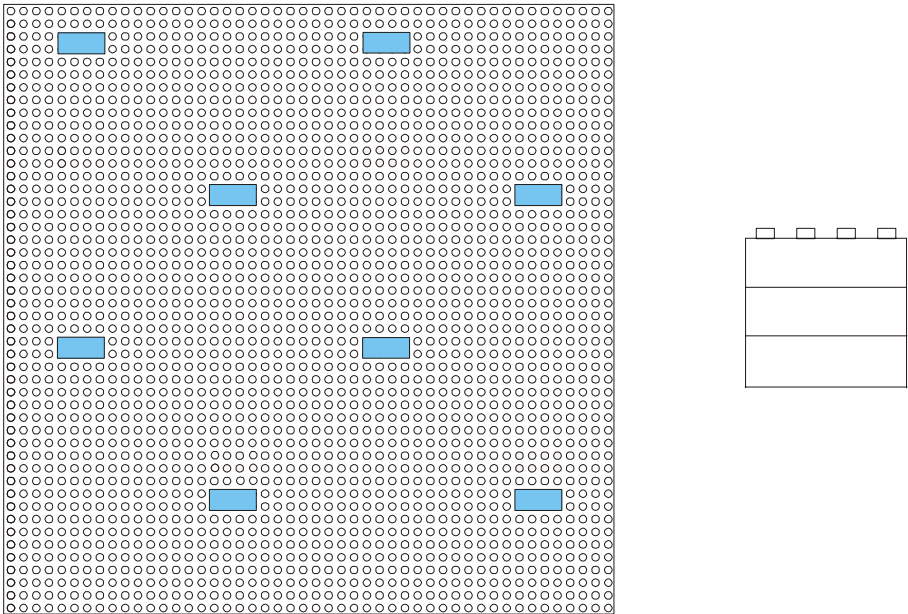
Slika A.40: Mjerilo 1:250, barijera 15, podna hrapavost R15



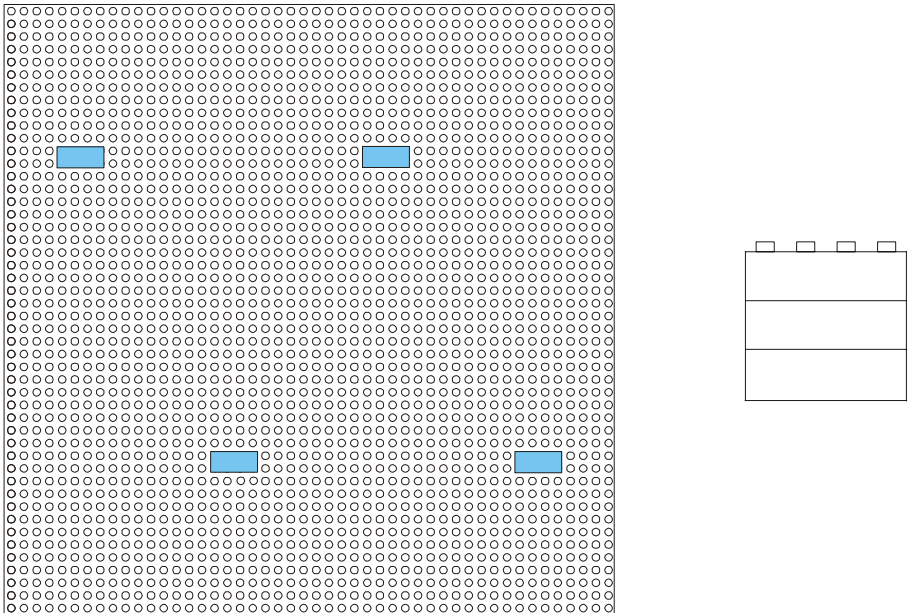
Slika A.41: Mjerilo 1:250, barijera 15, podna hrapavost R13

Prilog B

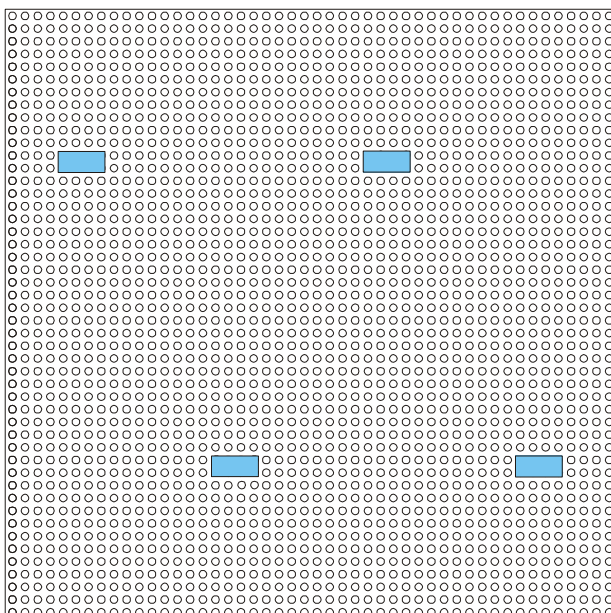
- Strukture podne hrapavosti -



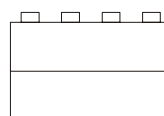
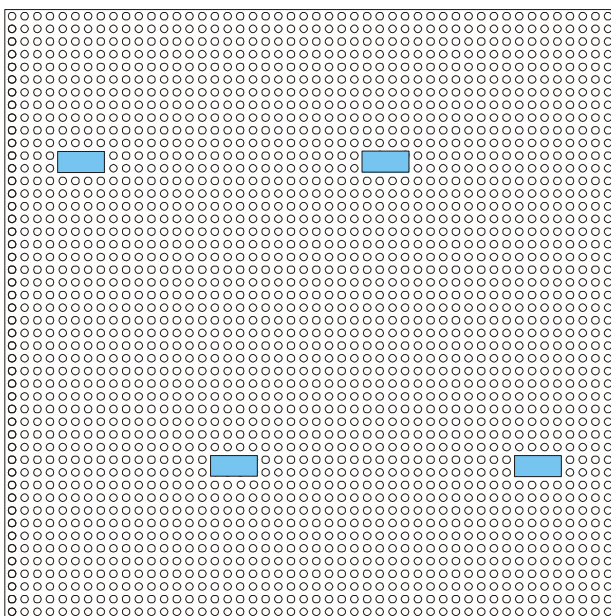
Slika B.1: Podna hrapavost R1



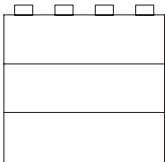
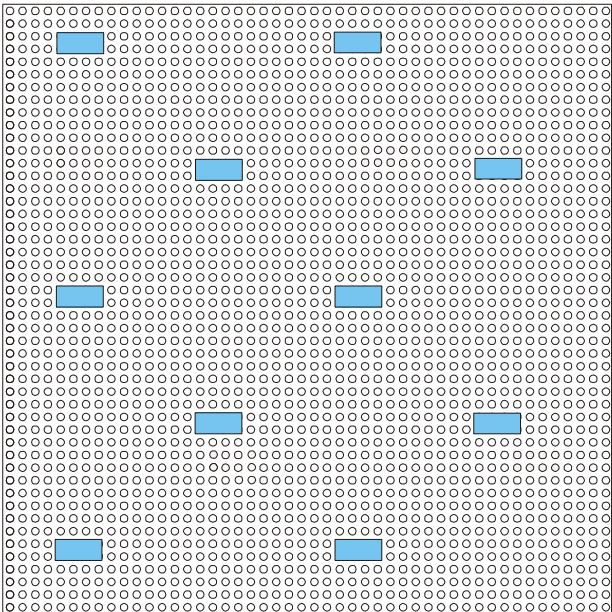
Slika B.2: Podna hrapavost R2



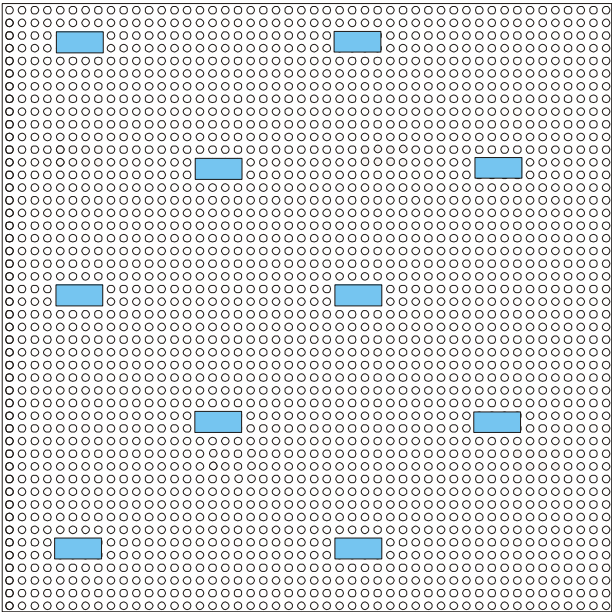
Slika B.3: Podna hrapavost R3



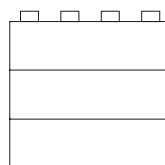
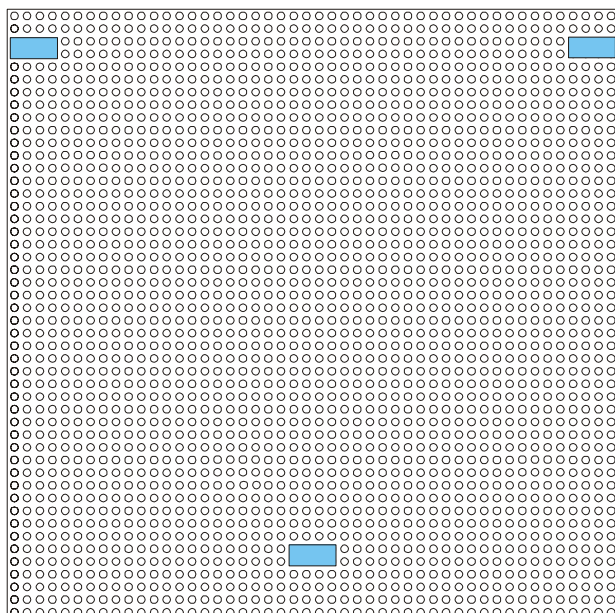
Slika B.4: Podna hrapavost R4



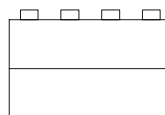
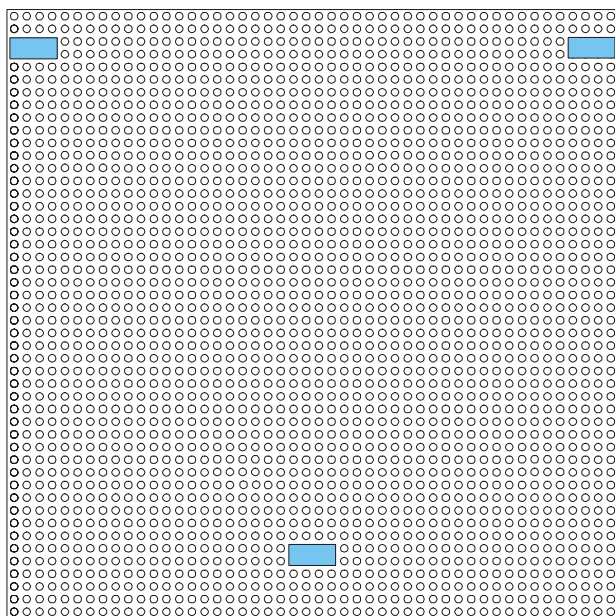
Slika B.5: Podna hrapavost R5



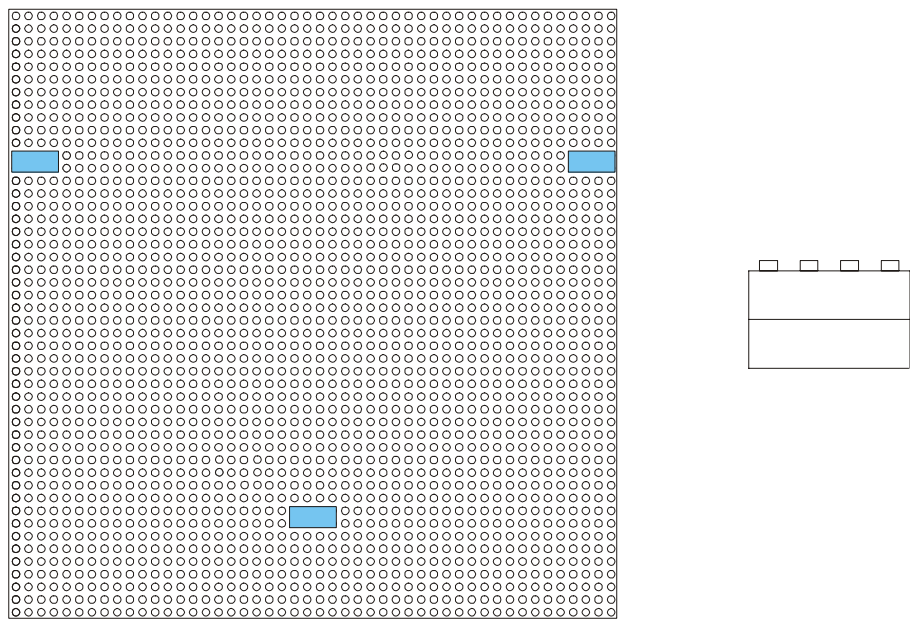
Slika B.6: Podna hrapavost R6



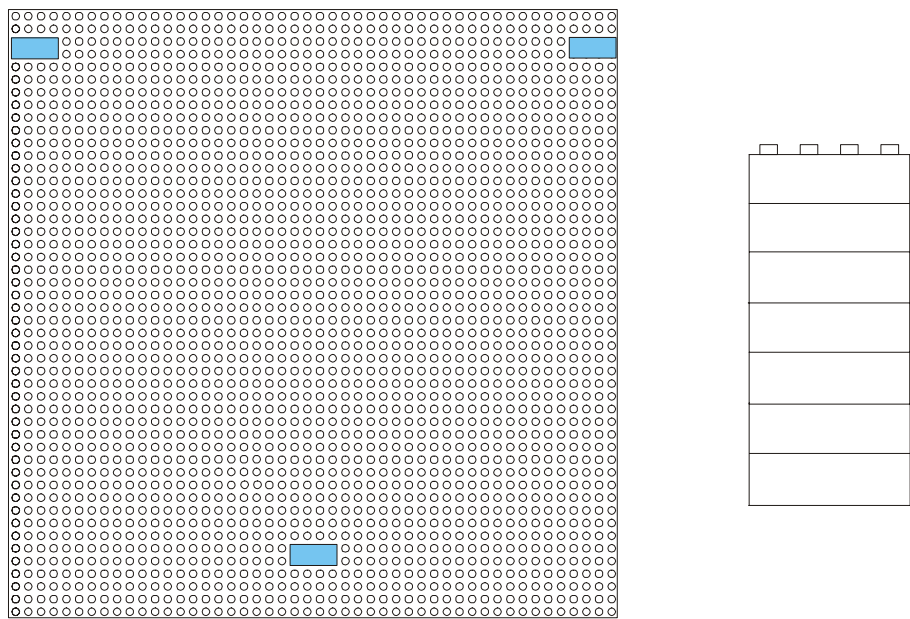
Slika B.7: Podna hrapavost R7



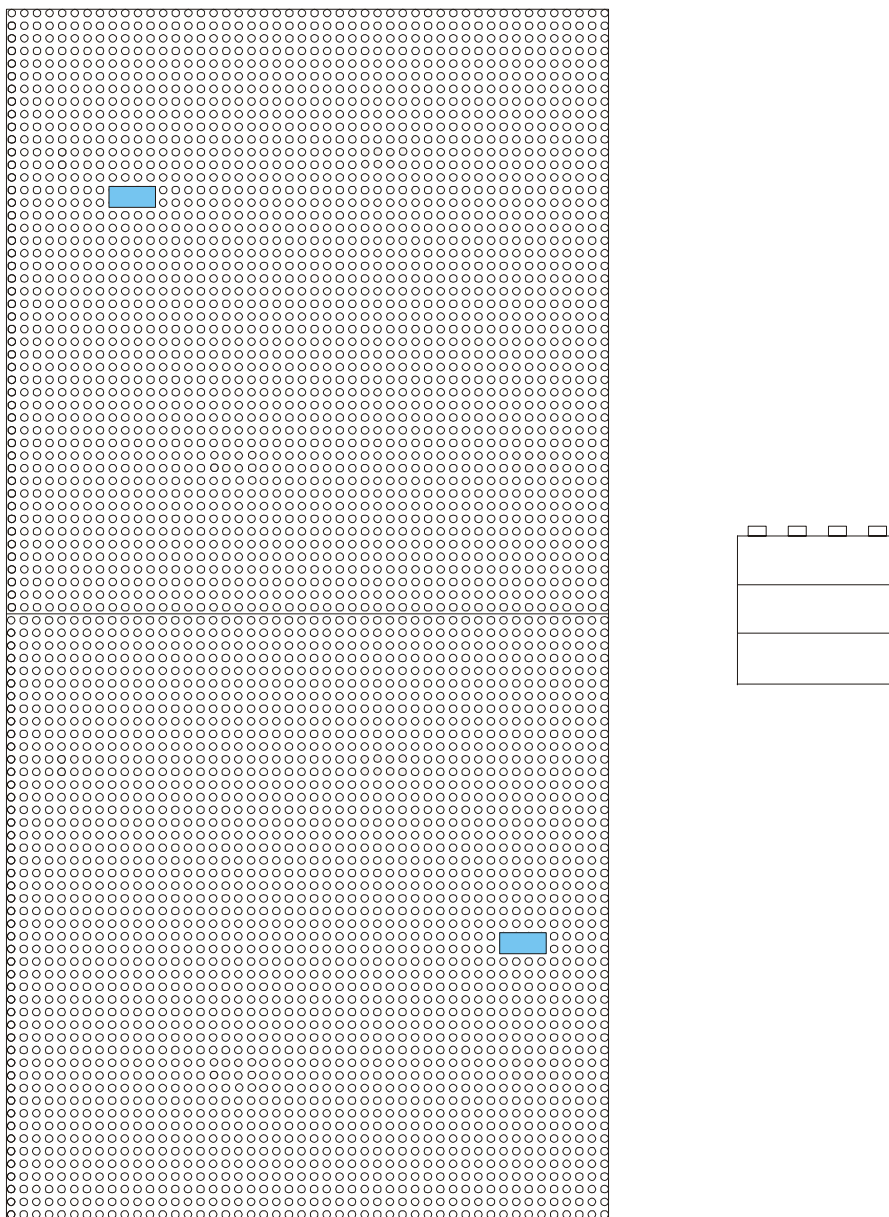
Slika B.8: Podna hrapavost R8



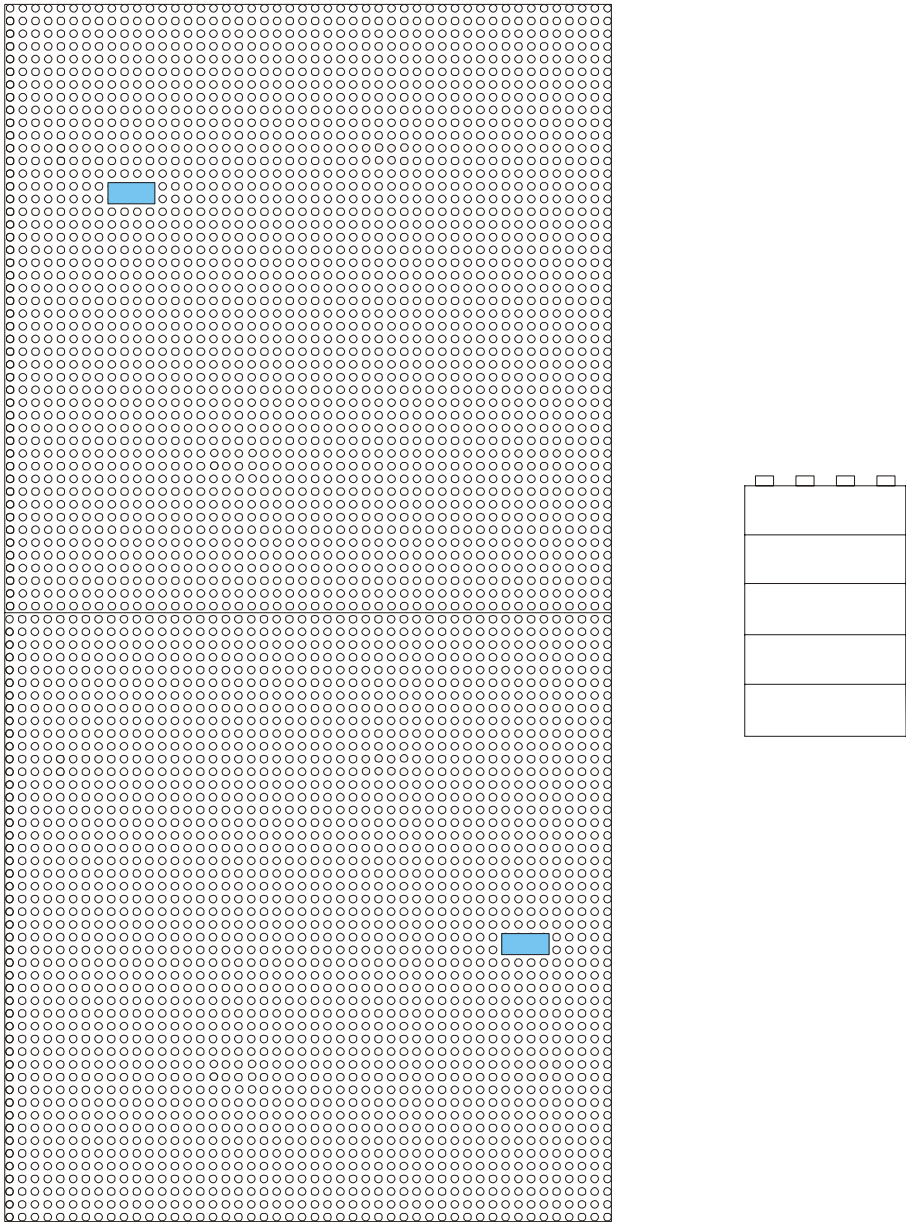
Slika B.9: Podna hrapavost R9



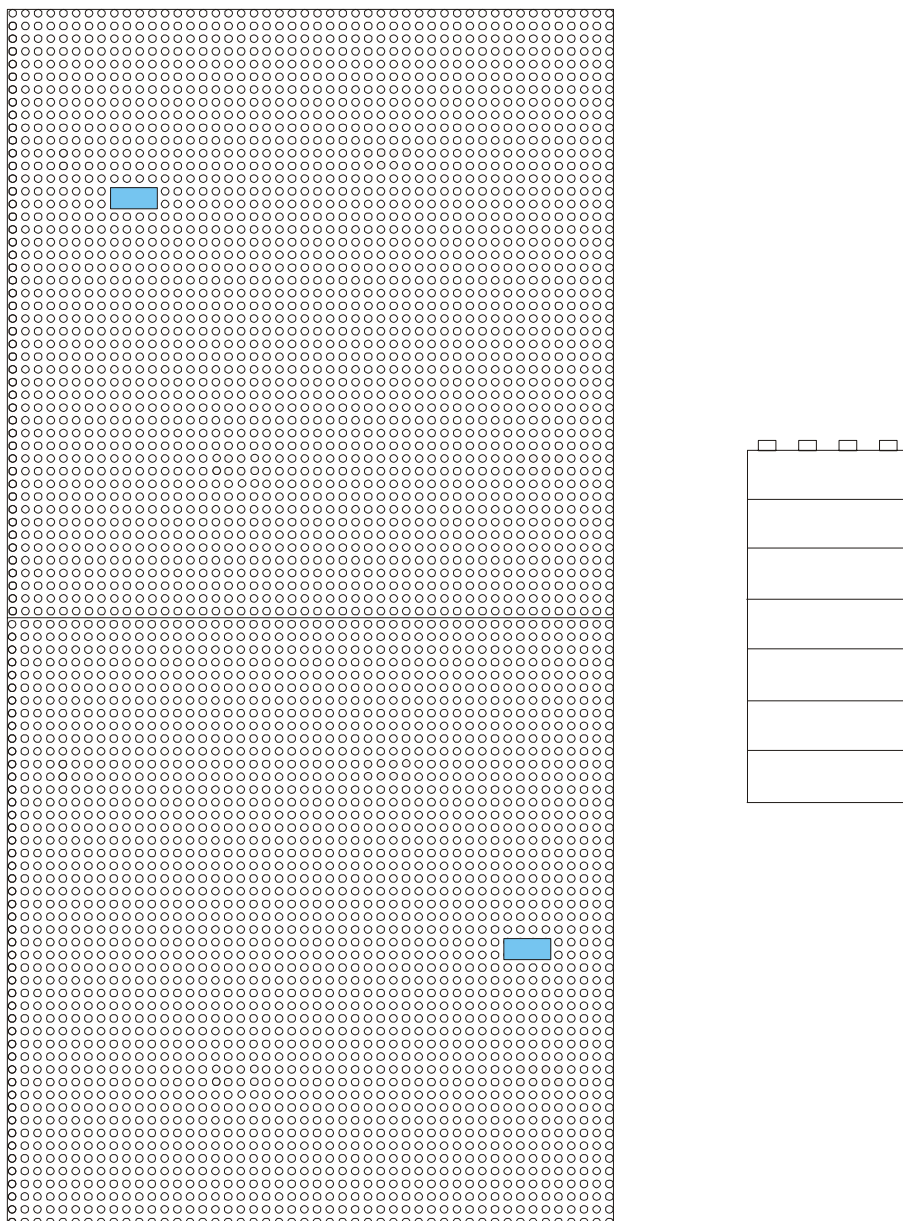
Slika B.10: Podna hrapavost R13



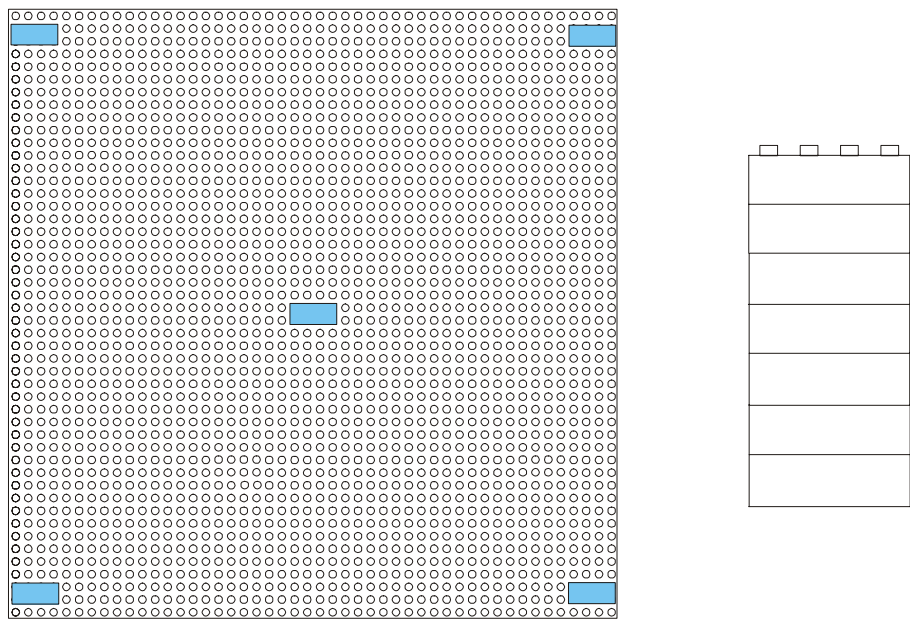
Slika B.11: Podna hrapavost R10



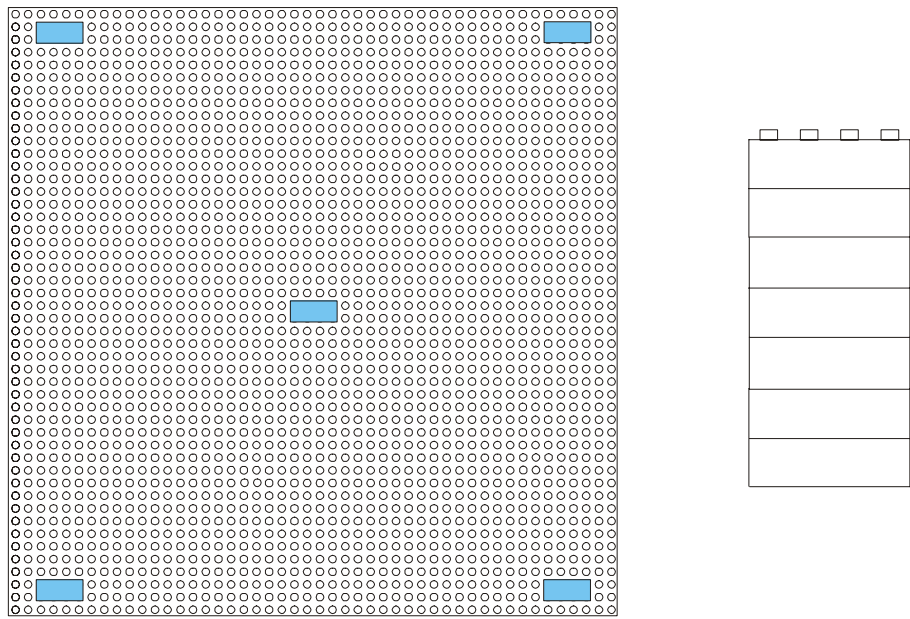
Slika B.12: Podna hrapavost R11



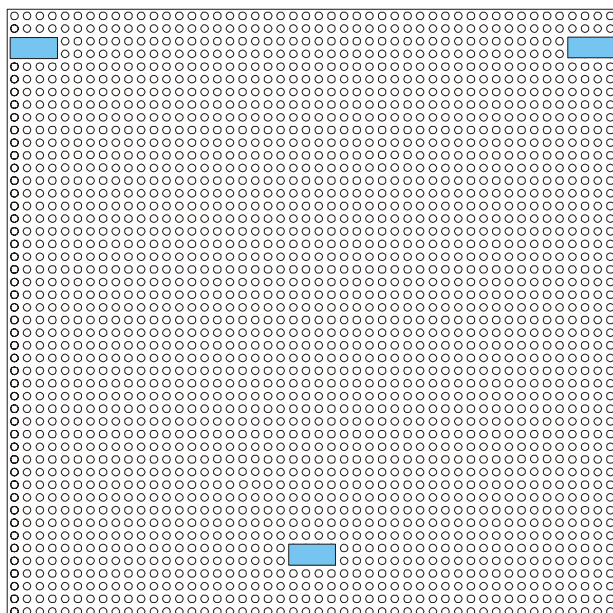
Slika B.13: Podna hrapavost R12



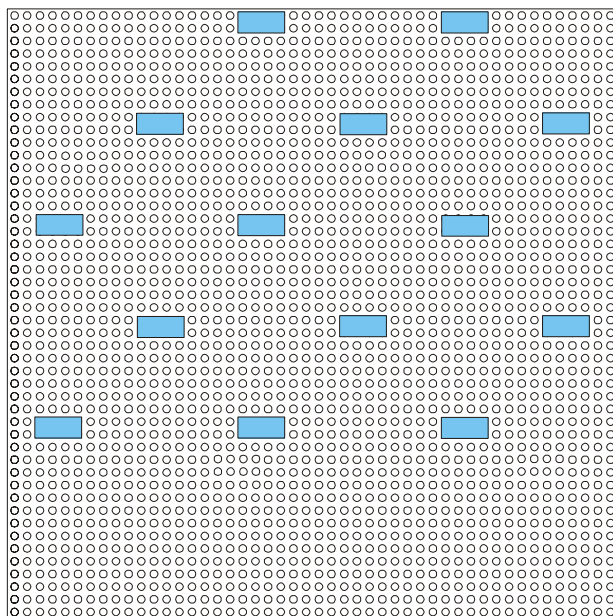
Slika B.14: Podna hrapavost R14



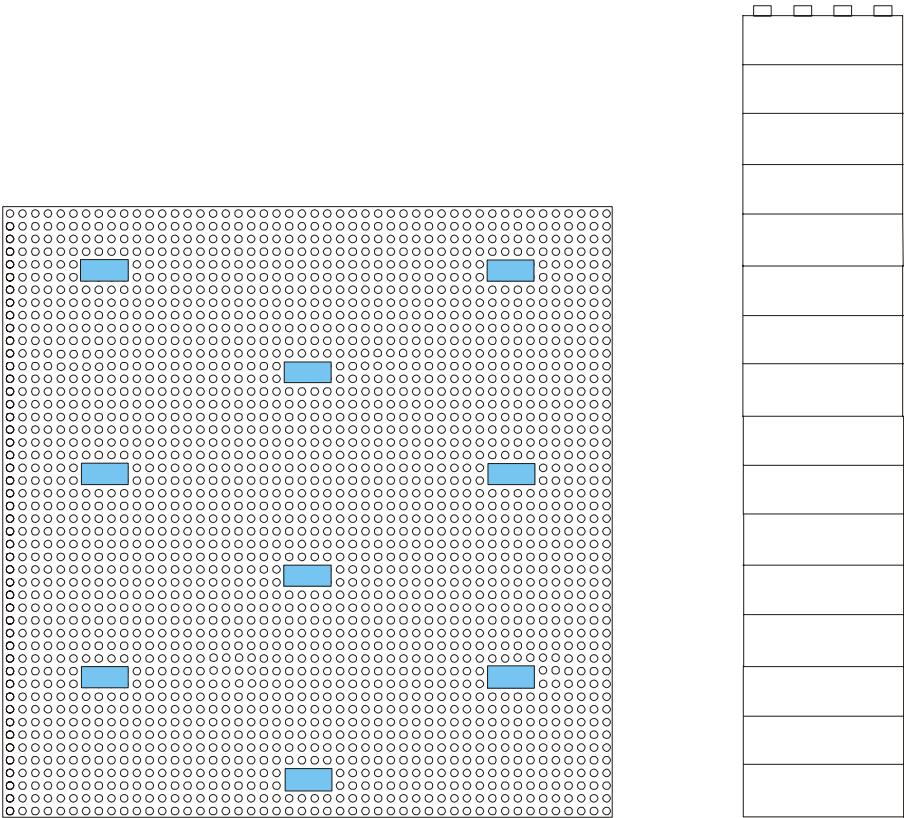
Slika B.15: Podna hrapavost R15



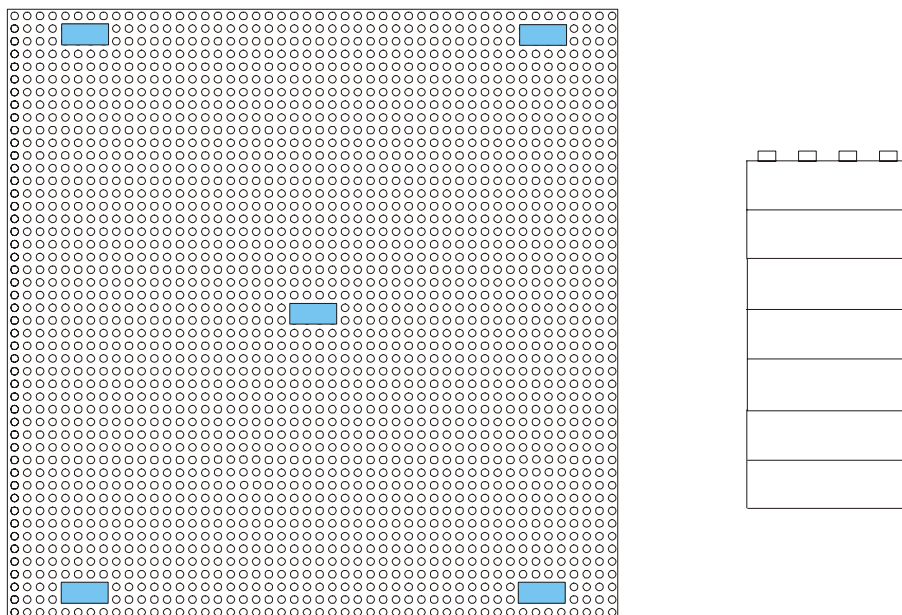
Slika B.16: Podna hrapavost R16



Slika B.17: Podna hrapavost R17



Slika B.18: Podna hrapavost R18



Slika B.19: Podna hrapavost R19

ŽIVOTOPIS

Prezime, ime: KOZMAR, HRVOJE

Datum i mjesto rođenja: 16.11.1968., SPLIT, HRVATSKA

Bračno stanje: OŽENJEN, KĆER MARE I SIN MARKO

Osnovna škola: 1975. – 1983.
SPLIT

Srednja škola: 1983. – 1987.
MATEMATIČKO-INFORMATIČKI OBRAZOVNI CENTAR, SPLIT
1982. – 1986.
CENTAR ZA ODGOJ I OBRAZOVANJE U UMJETNOSTI I KULTURI, SPLIT

Vojni rok: 09/1987. – 09/1988.

Studij: 1988. – 1989.
SVEUČILIŠTE U SPLITU, FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE, STUDIJ STROJARSTVA
1989. – 1994.
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU, FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE, STUDIJ STROJARSTVA, SMJER PROCESNO-ENERGETSKI (STIPENDIST BRODOGRADILIŠTA U SPLITU), DIPL.ING. STROJARSTVA

Poslijediplomski studij: 1994. – 2000.
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU, FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE POSLIJEDIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVA, SMJER PROCESNO-ENERGETSKI, MAGISTAR TEHNIČKIH ZNANOSTI (MR.SC.)

Namještenja: 01/1995. – 03/1996.
DIPL. ING. STROJARSTVA, FIRMA „SOLTECH“ U ZAGREBU
03/1996. –
ASISTENT NA KATEDRI ZA MEHANIKU FLUIDA, FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

Specijalizacija: 03/1998. – 02/2000., 05/2002.. – 10/2002.
ASISTENT NA KATEDRI ZA MEHANIKU FLUIDA, FAKULTET STROJARSTVA TEHNIČKOG SVEUČILIŠTA U MÜNCHENU (GODIŠNJA STIPENDIJA MINISTARSTVA ZNANOSTI I TEHNOLOGIJE REPUBLIKE HRVATSKE, DAAD GODIŠNJA STIPENDIJA, STIPENDIJA HRVATSKE AKADEMIJE ZNANOSTI I UMJETNOSTI - HAZU)

Istraživački rad: SURADNIK NA ZNANSTVENO-ISTRAŽIVAČKIM PROJEKTIMA MINISTARSTVA ZNANOSTI I TEHNOLOGIJE REPUBLIKE HRVATSKE
1996. – 1997.
TEORIJSKE OSNOVE EKSPERIMENTALNOG ODREĐIVANJA OTPORA VALOVA, BP 2-09-330, VODITELJ PROF. DR. ZDRAVKO DOLINER
1997. – 2002.
MJERENJA U MEHANICI FLUIDA, BP 120-017, VODITELJ PROF. DR. ZDRAVKO DOLINER
2002. –
EKSPERIMENTI U MEHANICI FLUIDA, BP 0120-012, VODITELJ PROF. DR. ANDREJA WERNER

Znanje jezika: NJEMAČKI – VRLO DOBRO
ENGLESKI – VRLO DOBRO

BIOGRAPHY

Name: KOZMAR, HRVOJE

Date and place of birth: 16.11.1968., SPLIT, CROATIA

Marital status: MARRIED, DAUGHTER MARE AND SON MARKO

Primary school: 1975. – 1983.
SPLIT

Secondary school: 1983. – 1987.
SECONDARY SCHOOL OF MATHEMATICS AND INFORMATICS, SPLIT
1982. – 1986.
MUSIC SECONDARY SCHOOL, SPLIT

Military service: 09/1987. – 09/1988.

Study: 1988. – 1989.
UNIVERSITY OF SPLIT, FACULTY OF ELECTROTECHNICS, MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL ARCHITECTURE, STUDY OF MECHANICAL ENGINEERING
1989. – 1994.
UNIVERSITY OF ZAGREB, FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL ARCHITECTURE, STUDY OF MECHANICAL ENGINEERING (PROCESSING EQUIPMENT AND POWER GENERATION), SCHOLARSHIP OF THE SPLIT SHIPYARD DURING THE ENTIRE COURSE OF STUDY

Postgraduate study: 1994. – 2000.
UNIVERSITY OF ZAGREB, FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL ARCHITECTURE, FIELD: PROCESSING EQUIPMENT AND POWER GENERATION

Work experience: 01/1995. – 03/1996.
PROJECT MANAGER IN THE COMPANY „SOLTECH“, ZAGREB
03/1996. –
ASSISTANT AT THE UNIVERSITY OF ZAGREB, FIELD: FLUID MECHANICS

Specialization: 03/1998. – 02/2000., 05/2002.. – 10/2002.
ASSISTANT AT THE TU-MUNICH, FIELD: AERODYNAMICS, (ANNUAL SCHOLARSHIP FROM THE CROATIAN MINISTRY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, ANNUAL SCHOLARSHIP FROM GERMAN ACADEMIC EXCHANGE SERVICE, SCHOLARSHIP FROM THE CROATIAN ACADEMY OF SCIENCES AND ARTS)

Research activity: COLLABORATOR AT RESEARCH PROJECTS FINANCED BY THE MINISTRY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF THE REPUBLIC OF CROATIA
1996. – 1997.
THEORETICAL BASIS FOR EXPERIMENTAL DETERMINATION OF SHIP RESISTANCE, BP 2-09-330, MAIN RESEARCHER PROF. ZDRAVKO DOLINER, PH.D.
1997. – 2002.
MEASUREMENTS IN FLUID MECHANICS, BP 120-017, MAIN RESEARCHER PROF. ZDRAVKO DOLINER, PH.D.
2002. –
EXPERIMENTS IN FLUID MECHANICS, BP 0120-012, MAIN RESEARCHER PROF. ANDREJA WERNER, PH.D.

Languages: GERMAN - FLUENT
ENGLISH - FLUENT